



TUGAS AKHIR - TM 141585

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGATURAN *START OF INJECTION* DAN DURASI INJEKSI TERHADAP UNJUK KERJA MESIN DIESEL DIAMOND TIPE DI 800 SISTEM INJEKSI BERTINGKAT BERBAHAN BAKAR BIODIESEL MINYAK JELANTAH

Rahmat Sholeh Hanifa
NRP. 2114 105 058

Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TM141586

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGATURAN *START OF INJECTION* DAN DURASI INJEKSI TERHADAP UNJUK KERJA MESIN DIESEL DIAMOND TIPE DI 800 SISTEM INJEKSI BERTINGKAT BERBAHAN BAKAR BIODIESEL MINYAK JELANTAH

**RAHMAT SHOLEH HANIFA
NRP. 2114 105 058**

**Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT – TM141586

EXPERIMENT STUDY EFFECT OF SETTING START OF INJECTION AND DURATION INJECTION ON DIAMOND ENGINE PERFORMANCE TYPE DI 800 MULTI INJECTION SYSTEM WITH WASTE COOKING OIL BIODIESEL

**RAHMAT SHOLEH HANIFA
NRP. 2114 105 058**

**Counsellor Lecture
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technologi
Surabaya
2017**

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGATURAN START OF INJECTION DAN DURASI INJEKSI TERHADAP UNJUK KERJA MESIN DIESEL DIAMOND TIPE DI 800 SISTEM INJEKSI BERTINGKAT BERBAHAN BAHAN BAKAR BIODIESEL MINYAK JELANTAH

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RAHMAT SHOLEH HANIFA

NRP. 2114 105 058

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT (Pembimbing)
NIP. 197301161997021001
2. Ary Bachtiar K.P., ST, MT, PhD (Penguji I)
NIP. 197105241997021001
3. Bb. Arip Dwiyanoro, ST, M.Eng, PhD (Penguji II)
NIP. 197804012002121001
4. Vivien Suphandini, ST, ME, PhD (Penguji III)
NIP. 198105292003122001

SURABAYA

JANUARI, 2017

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGATURAN
START OF INJECTION DAN DURASI INJEKSI
TERHADAP UNJUK KERJA MESIN DIESEL DIAMOND
TIPE DI 800 SISTEM INJEKSI BERTINGKAT BERBAHAN
BAKAR BIODIESEL MINYAK JELANTAH**

Nama Mahasiswa : Rahmat Sholeh Hanifa
NRP : 2114105058
Jurusan : Teknik Mesin FTI - ITS
Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta. ST., MT.

ABSTRAK

Biodiesel sebagai bahan bakar alternatif yang renewable dapat mengurangi atau menggantikan bahan bakar fosil yang kandungannya semakin menipis. Namun biodiesel memiliki propertis fisik berupa viskositas, densitas yang relatif lebih besar, tetapi mempunyai nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil dan biodiesel dapat meningkatkan emisi NOx serta nilai sfc. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengaturan start of injection dan durasi injeksi terhadap unjuk kerja dan emisi gas buang mesin diesel sistem injeksi bertingkat.

Penelitian ini menggunakan bahan bakar biodiesel minyak jelantah dengan prosentase volumetric 100% (B100) dengan mengaplikasikan injektor solenoid pada mesin diesel empat langkah Diamond tipe Di 800. Pengujian ini dilakukan dengan injeksi bertingkat pada 75%-25% dan mengatur start of injection dengan nilai 10°, 12°, 14°, dan 16° before top dead center (BTDC) dan durasi injeksi dengan nilai 13, 15, 17, dan 19 milisecond (ms). Proses pengaturan start of injection dan durasi injeksi diatur oleh ECU programmable. Pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar yang berada di Teknik Mesin FTI ITS Surabaya. Penelitian diawali dengan proses pembuatan biodiesel minyak jelantah dan pengujian propertis karakteristik biodiesel sebelum dilakukannya pengujian pada mesin diesel.

Kemudian, dilakukan pengujian unjuk kerja pada putaran konstan (2000 rpm), pengambilan data pada pembebanan 500 Watt sampai 4.000 Watt dengan interval 500 Watt.

Hasil yang didapatkan adalah sistem injeksi bertingkat 75%-25% dengan variasi start of injection dan durasi injeksi diperoleh nilai daya, torsi, dan bmep mengalami kenaikan tetapi nilai sfc naik dan nilai efisiensi thermal turun dibandingkan sistem injeksi bertingkat 75%-25% standar. Nilai daya, torsi, dan bmep mengalami kenaikan maksimum pada pengaturan start of injection 16° CA BTDC dan pengaturan durasi injeksi 19 ms sebesar 5,56 %, 8,2 %, dan 7,9 % dan kenaikan terendah sebesar 0,7 %, 0,7 %, dan 0,9 %. Kenaikan nilai Sfc paling tinggi sebesar 5,84 % pada pengaturan start of injection 16° CA BTDC dan pengaturan durasi injeksi 19 ms dan paling rendah sebesar 1,16 % pada pengaturan start of injection 10° CA BTDC dengan pengaturan durasi injeksi 13 ms, sedangkan nilai efisiensi thermal mengalami penurunan paling tinggi sebesar 3,71 % pada pengaturan start of injection 16° CA BTDC dan pengaturan durasi injeksi 19 ms dan penurunan paling rendah pada pengaturan start of injection 10° CA BTDC dan pengaturan durasi injeksi 13 ms sebesar 0,82 %. Produksi emisi NOx pada start of injection 16° CA BTDC dengan variasi durasi injeksi 13, 15, 17, dan 19 ms meningkat dengan nilai rata-rata 6,1 % dibandingkan sistem injeksi bertingkat 75%-25% standar.

Kata kunci: *Biodiesel minyak jelantah, Start of Injection dan Durasi Injeksi, Injeksi bertingkat*

EXPERIMENT STUDY EFFECT OF SETTING START OF INJECTION AND DURATION INJECTION ON DIAMOND ENGINE PERFORMANCE TYPE DI 800 MULTI INJECTION SYSTEM WITH WASTE COOKING OIL BIODIESEL

Name : Rahmat Sholeh Hanifa
NRP : 2114 105 058
Department : Mechanical Engineering FTI - ITS
Counsellor Lecture : Dr. Bambang Sudarmanta. ST., MT.

ABSTRACT

Biodiesel is an renewable alternative fuel that can be reduce or replace fossil fuel dwindling. But biodiesel has physical properties such as viscosity, density is relatively large, but has a lower calorific value compared with fossil fuel and NOx emissions and sfc increase with increasing concentrations of biodiesel. This study was conducted to determine the effect of setting the start of injection and injection duration of the performance and exhaust emissions of diesel engines with multistage injection system.

This study uses waste cooking oil biodiesel fuels with volumetric percentage of 100% (B100) by applying a solenoid injectors in diesel engines are four steps Diamond type in 800. The test is performed by multistage injection in 75% -25% and set the start of injection to the value of 10 °, 12 °, 14 °, and 16 ° before top dead center (BTDC) and injection duration with a value of 13, 15, 17, and 19 millisecond (ms). The process of setting injection duration is set by a programmable ECU. Tests carried out at the Laboratory of Combustion Engineering and Fuels that are in Mechanical Engineering FTI ITS Surabaya. The study begins with the process of making waste cooking oil biodiesel and biodiesel characteristic properties testing prior to testing on diesel engines. Then, the test performance at constant rotation (2000 rpm), the loading of data collection at load 500 Watt to 4,000 Watt to 500 Watt interval.

The results obtained are multistage injection system 75% - 25% with a variation of the start of injection and injection duration values obtained effective power, torque, and BMEP increased but the value of SFC increase and thermal efficiency decrease compared with multistage injection system 75% -25% of the standard. Value of effective power, torque, and increases the maximum BMEP at the start of injection setting of 16 ° CA BTDC and setting 19 ms injection duration by 5.56%, 8.2%, and 7.9% and the lowest increase of 0.7%, 0.7% and 0.9%. SFC highest increase in value of 5.84% at the start of injection setting of 16 ° CA BTDC and injection duration setting 19 ms and a minimum of 1.16% at the start of injection setting 10 ° CA BTDC and setting of injection duration 13 ms, while at thermal efficiency value decreased a maximum of 3.71% at the start of injection setting of 16 ° CA BTDC and 19 ms injection duration settings and lowest decline at the start of injection setting 10 ° CA BTDC and 13 ms duration setting injection of 0.82 %. The production of NO_x emissions at the start of injection to 16 ° CA BTDC with a variation of the duration of injection 13, 15, 17, and 19 ms increases with an average value of 6.1% compared with 75% -25% the standard of multistage injection system

Keywords: Waste cooking oil biodiesel, Start of Injection and Injection Duration, Multistage Injection

KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah penulis panjatkan atas ke hadirat ALLAH SWT yang telah memberikan segala rahmat serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir ini yang berjudul :

**” STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGATURAN
START OF INJECTION DAN DURASI INJEKSI
TERHADAP UNJUK KERJA MESIN DIESEL DIAMOND
TIPE DI 800 SISTEM INJEKSI BERTINGKAT
BERBAHAN BAKAR BIODIESEL MINYAK JELANTAH”**

Penyelesaian Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat kelulusan akademis untuk memperoleh gelar Ahli Madya dalam menempuh pendidikan di Program Studi Lintas Jalur S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian penyusunan Karya Tulis Ilmiah ini tidak lepas dari dukungan serta bantuan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, yakni :

1. Allah SWT dan junjungan besar Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan ketenangan dalam jiwaku.
2. Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah banyak memberikan pengarahan dan ilmu mengenai Motor Bakar yang berkaitan dengan penulisan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Bambang Pramujati ST, M. Eng, PhD. selaku Ketua Jurusan S1 Teknik Mesin FTI-ITS.
4. Ibu Dinny Harnany, ST, MSc. selaku dosen wali.
5. Dosen tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.
6. Orang tua Penulis dan keluarga atas do'a restu, kasih sayang, dan dukungannya selama ini.

7. Agus Supradian, Ucay, Imam yang menemani dan membantu selama proses berlangsungnya Tugas Akhir dengan ikhlas.
8. Keluarga Lab. TPBB yang telah membantu dan menemani dalam bimbingan Tugas Akhir sampai selesainya Tugas Akhir ini.
9. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan namanya yang telah banyak membantu dan memberikan dukungannya bagi penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis sangat menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Maka sangat diperlukan kritik dan saran yang dapat membangun dalam penyempurnaan penulisan. Akhirnya besar harapan penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak terutama bagi pembaca.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Teori Dasar Mesin Diesel	7
2.1.1 Prinsip Kerja Motor Diesel Empat Langkah	7
2.1.2 Tahapan Pembakaran Pada Mesin Diesel	8
2.2 Unjuk Kerja Mesin Diesel	10
2.2.1 Daya	11
2.2.2 Torsi	11
2.2.3 Tekanan Efektif Rata-Rata	12
2.2.4 <i>Spesific Fuel Consumption</i>	12
2.2.5 Efisiensi Thermal	13
2.2.6 Emisi Gas Buang	14

2.3 Injektor.....	14
2.3.1 Profil Udara Masuk Dan Laju Aliran Bahan Bakar Menurut Heywood	15
2.4 Sistem Injeksi Bertingkat.....	16
2.4.1 Karakteristik ECU dan Karakteristik Injeksi Satu Tingkat Maupun Dua Tingkat	17
2.4.1 Penerapan Sistem Injeksi Bertingkat	19
2.4.1 Keunggulan Sistem Injeksi Bertingkat	19
2.4.2 Kekurangan Sistem Injeksi Bertingkat	20
2.5 Pengaruh Pengaturan SOI terhadap Mesin	21
2.6 Pengaruh Pengaturan Durasi Injeksi terhadap Mesin	22
2.7 Bahan Bakar	24
2.8 Biodiesel	28
2.8.1 Minyak Jelantah.....	30
2.8.1 Cara Pembuatan Biodiesel Minyak Jelantah.....	32
2.9 Penelitian Terdahulu	32
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Proses Pembuatan Dan Alat Yang Digunakan Dalam Pembuatan Biodiesel	37
3.2 Alat Uji	41
3.3 Alat Ukur	45
3.4 Prosedur Pengujian	49
3.4.1 Tahapan Pengujian	49
3.5 Skema Pengujian	51
3.6 Rancangan Eksperimen	52

3.7 Flowchart Penelitian	53
3.7.1 Flowchart Penelitian Injeksi Bertingkat Standar	53
3.7.2 Flowchart Penelitian Injeksi Bertingkat Dengan Variasi SOI dan Durasi Injeksi.....	54
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Pengambilan Data.....	57
4.2 Perhitungan Durasi Injeksi Bahan Bakar Biodiesel	57
4.3 Perhitungan Unjuk Kerja.....	58
4.3.1 Menghitung Laju Aliran Massa Biodiesel	58
4.3.2 Daya Efektif.....	59
4.3.3 Torsi.....	59
4.3.4 Tekanan Efektif Rata-Rata	60
4.3.5 <i>Specific Fuel Consumption</i>	61
4.3.6 Efisiensi Thermal.....	61
4.4 Analisa Unjuk Kerja	62
4.4.1 Daya Efektif.....	62
4.4.2 Torsi.....	64
4.4.3 Tekanan Efektif Rata-Rata	67
4.4.4 <i>Specific Fuel Consumption</i>	70
4.4.5 Efisiensi Thermal.....	75
4.4.6 Analisa Temperatur Gas Buang.....	78
4.4.7 Analisa Temperatur Mesin	81
4.4.8 Analisa Temperatur Oli	83
4.4.9 Analisa Temperatur Radiator.....	86
4.4.10 Emisi Gas Buang	88
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	91

5.2 Saran	92
-----------------	----

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prinsip Kerja dan Diagram Katup Motor Diesel Empat Langkah	8
Gambar 2.2 Tahapan Pembakaran Pada Mesin Diesel	9
Gambar 2.3 Injektor Selenoid.....	15
Gambar 2.4 Grafik <i>Mass Flow Rate</i> Udara Masuk dan <i>Exhaust Terhadap Crank Angle Fuel Mass Flow Rate</i>	16
Gambar 2.5 Skema ECU	18
Gambar 2.6 Karakteristik Injeksi Satu tingkat dan Karakteristik Injeksi Dua Tingkat.....	19
Gambar 2.7 Proses Skema Injeksi Bertingkat Pada Penelitian Sebelumnya.....	20
Gambar 2.8 Diagram katup dengan variasi <i>Start of Injection</i>	22
Gambar 2.9 Diagram katup SOI 10 ⁰ BTDC durasi injeksi 13, 15, 17, 19 ms	23
Gambar 2.10 Diagram katup SOI 12 ⁰ BTDC durasi injeksi 13, 15, 17, 19 ms	23
Gambar 2.11 Diagram katup SOI 14 ⁰ BTDC durasi injeksi 13, 15, 17, 19 ms	23
Gambar 2.12 Diagram katup SOI 16 ⁰ BTDC durasi injeksi 13, 15, 17, 19 ms	23
Gambar 2.13 Grafik Tekanan Terhadap Derajat <i>Crank Angle</i>	24
Gambar 2.14 Minyak Jelantah.....	31
Gambar 2.15 Diagram Alir Pembuatan Biodiesel ..	32
Gambar 2.16 Hubungan pengaruh tipe injeksi terhadap NOx dan Particulate	33

Gambar 2.17 Produksi NO terhadap derajat engkol dan tipe injeksi	34
Gambar 2.18 <i>Effect of injection strategies on the combustion characteristics in low compression ratio engine</i>	35
Gambar 2.19 Grafik Unjuk Kerja Penelitian Arief Hardiyanto.....	36
Gambar 3.1 Hasil Metoxide.....	38
Gambar 3.2 Proses pemasakan	39
Gambar 3.3 Hasil Proses Pemisahan Crude Gliserin, Sedangkan Lapisan Atas Berwarna Bening, Crude BD	39
Gambar 3.4 Hasil Produksi Biodiesel.....	40
Gambar 3.5 Mesin Diesel DI 800	41
Gambar 3.6 Generator Daiho.....	42
Gambar 3.7 Injektor standar Toyota Kijang Innova D4D	43
Gambar 3.8 ECU DECS	43
Gambar 3.9 Sensor Crank.....	44
Gambar 3.10 Accu Yuasa.....	44
Gambar 3.11 Accu Charger	45
Gambar 3.12 Thermocouple tipe K	45
Gambar 3.13 Gelas Ukur	46
Gambar 3.14 Stopwatch	46
Gambar 3.15 Amperemeter	47
Gambar 3.16 Thermocouple Digital	47
Gambar 3.17 Tachometer	48
Gambar 3.18 Beban Lampu.....	48
Gambar 3.19 Skema Pengujian	51
Gambar 3.20 <i>Flowchart</i> penelitian injeksi bertingkat standar	54

Gambar 3.20 <i>Flowchart</i> penelitian injeksi bertingkat Variasi SOI dan Durasi Injeksi	55
Gambar 4.1.a Grafik Daya Fungsi Beban dengan SOI 10 ⁰ BTDC	62
4.1.b Grafik Daya Fungsi Beban dengan SOI 12 ⁰ BTDC.....	62
4.1.c Grafik Daya Fungsi Beban dengan SOI 14 ⁰ BTDC	63
4.1.d Grafik Daya Fungsi Beban dengan SOI 16 ⁰ BTDC	63
Gambar 4.2.a Grafik Torsi Fungsi Beban dengan SOI 10 ⁰ BTDC	65
4.2.b Grafik Torsi Fungsi Beban dengan SOI 12 ⁰ BTDC	65
4.2.c Grafik Torsi Fungsi Beban dengan SOI 14 ⁰ BTDC	66
4.2.d Grafik Torsi Fungsi Beban dengan SOI 16 ⁰ BTDC	66
Gambar 4.3.a Grafik BMEP Fungsi Beban dengan SOI 10 ⁰ BTDC	67
4.3.b Grafik BMEP Fungsi Beban dengan SOI 12 ⁰ BTDC	68
4.3.c Grafik BMEP Fungsi Beban dengan SOI 14 ⁰ BTDC.....	68
4.3.d Grafik BMEP Fungsi Beban dengan SOI 16 ⁰ BTDC	69

Gambar 4.4.a Grafik Sfc Fungsi Beban dengan SOI 10 ⁰ BTDC.....	70
4.4.b Grafik Sfc Fungsi Beban dengan SOI 12 ⁰ BTDC	70
4.4.c Grafik Sfc Fungsi Beban dengan SOI 14 ⁰ BTDC	71
4.4.d Grafik Sfc Fungsi Beban dengan SOI 16 ⁰ BTDC.....	71
4.4.e Grafik Sfc Fungsi Beban dengan DI 13 ms.....	72
4.4.f Grafik Sfc Fungsi Beban dengan DI 15 ms.....	73
4.4.g Grafik Sfc Fungsi Beban dengan DI 17 ms.....	73
4.4.g Grafik Sfc Fungsi Beban dengan DI 19 ms.....	74
Gambar 4.5.a Grafik Nilai Effisiensi Thermal Fungsi Beban pada SOI 10 ⁰ BTDC	75
4.5.b Grafik Nilai Effisiensi Thermal Fungsi Beban pada SOI 12 ⁰ BTDC	76
4.5.c Grafik Nilai Effisiensi Thermal Fungsi Beban pada SOI 14 ⁰ BTDC	76
4.5.d Grafik Nilai Effisiensi Thermal Fungsi Beban pada SOI 16 ⁰ BTDC	77
Gambar 4.6.a Grafik Temperatur Gas Buang Fungsi Beban dengan SOI 10 ⁰ BTDC	78
4.6.b Grafik Temperatur Gas Buang Fungsi Beban dengan SOI 12 ⁰ BTDC.....	79
4.6.c Grafik Temperatur Gas Buang Fungsi Beban dengan SOI 14 ⁰ BTDC	79

4.6.d	Temperatur Gas Buang Fungsi Beban dengan SOI 16 ⁰ BTDC.....	80
Gambar 4.7.a	Grafik Temperatur Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 10 ⁰ BTDC.....	81
4.7.b	Grafik Temperatur Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 12 ⁰ BTDC.....	81
4.7.c	Grafik Temperatur Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 14 ⁰ BTDC	82
4.7.d	Grafik Temperatur Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 16 ⁰ BTDC	82
Gambar 4.8.a	Grafik Temperatur Oli Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 10 ⁰ BTDC.....	83
4.8.b	Grafik Temperatur Oli Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 12 ⁰ BTDC.....	84
4.8.c	Grafik Temperatur Oli Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 14 ⁰ BTDC.....	84
4.8.d	Grafik Temperatur Oli Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 16 ⁰ BTDC.....	85
Gambar 4.9.a	Grafik Temperatur Pendingin Fungsi Beban Dengan SOI 10 ⁰ BTDC.....	86
4.9.b	Grafik Temperatur Pendingin Fungsi Beban Dengan SOI 12 ⁰ BTDC.....	86
4.9.c	Grafik Temperatur Pendingin Fungsi Beban Dengan SOI 14 ⁰ BTDC.....	87
4.9.d	Grafik Temperatur Pendingin Fungsi Beban Dengan SOI 16 ⁰ BTDC.....	87
Gambar 4.10	Grafik NOx Fungsi Durasi Injeksi Dengan SOI 16 ⁰ BTDC	88

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Properties Bahan Bakar Solar.....	28
Tabel 2.2 Properties Biodiesel Standar SNI.....	29
Tabel 3.1 Karakteristik Pengujian Biodiesel	41
Tabel 3.2 Rancangan Eksperimen	52

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Bahan bakar minyak bumi atau *fossil fuel* merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbaharui dan diperkirakan akan habis jika dieksploitasi secara besar-besaran dan terus menerus. Pada saat ini sangat dibutuhkan suatu energi alternatif atau yang biasa disebut dengan biofuel kini telah dikembangkan dan diharapkan mampu mengurangi bahkan menggantikan *fossil fuel* yang persediannya semakin menipis serta akan lebih baik jika ramah lingkungan. Beberapa jenis tumbuhan telah terbukti dapat digunakan sebagai sumber energi, salah satunya dimanfaatkan untuk pembuatan biodiesel. Penggunaan biodiesel ini dimaksudkan untuk menunjang program pemerintah dalam hal penggunaan energi terbarukan atau energi alternatif sebagai bahan bakar.

Terdapat banyak penelitian mengenai pemanfaatan bahan bakar biodiesel yang telah dilakukan, terutama sejak terjadinya krisis energi pada tahun 1970-an. Namun bahan bakar biodiesel yang kini ada masih memiliki kekurangan, beberapa kesimpulan dari banyak penelitian yang berkaitan dengan penggunaan bahan bakar biodiesel seperti yang terdapat pada *The Biodiesel Handbook* oleh Knothe Gerhard, et al [1] adalah sebagai berikut :

- Emisi gas buang nitrogen oksida (NO_x) umumnya meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi biodiesel dibandingkan bahan bakar solar.
- Emisi gas buang, hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO) menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi biodiesel dibandingkan bahan bakar solar.
- Nilai Sfc (*Specific Fuel Consumption*) cenderung meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi biodiesel dibandingkan dengan bahan bakar solar.

Biodiesel mempunyai nilai propertis fisik yang berbeda dari solar, sehingga penggunaan biodiesel langsung pada mesin diesel standart dapat meningkatkan emisi gas NO_x dan juga

meningkatkan nilai Sfc. Untuk mengurangi emisi gas buang NO_x dan menurunkan nilai Sfc, diperlukan suatu *treatment* pada mesin diesel, dimana *treatment* bisa dilakukan sebelum pembakaran terjadi (*before combustion*), pada saat pembakaran terjadi (*on combustion*), dan setelah pembakaran terjadi (*after combustion*) [2]. *Treatment* pada saat pembakaran terjadi salah satunya adalah pengontrolan semprotan pada *injection nozzle*. Pada kondisi standar, mesin diesel menggunakan sistem injeksi tunggal dengan sekali semprotan bahan bakar dalam satu siklus kerja. Injeksi bahan bakar ini bisa dimodifikasi menjadi sistem injeksi bertingkat sehubungan untuk mengurangi emisi gas buang terutama NO_x dan akan menurunkan nilai Sfc. Formasi NO_x akan terbentuk pada temperatur dan tekanan yang tinggi saat proses pembakaran, sehingga untuk mengurangi emisi gas buang NO_x digunakan sistem injeksi bertingkat agar tekanan dan temperatur puncak tidak tinggi dan nilai Sfc juga turun. Namun hal ini akan berakibat pada turunnya daya dan performa pada mesin diesel.

Menurut Suh, Hyun Kyu [3], penggunaan sistem injeksi bertingkat dapat menurunkan tekanan puncak saat proses pembakaran dan menurunkan rata-rata kalor yang dilepas dan menyebabkan berkurangnya daya yang didapat, namun efektif dalam menurunkan emisi NO_x sebesar 58,7 % dan soot 25 %. Han Z, et al [4], bereksperimen dengan memodifikasi sistem injeksi mesin diesel Caterpillar 3406 satu tingkat menjadi sistem injeksi bertingkat dengan variasi persentase total bahan bakar yang diinjeksikan dan variasi total durasi injeksi. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem injeksi bertingkat dapat mengurangi mekanisme pembentukan emisi NO_x dan soot pada ruang bakar selama durasi injeksi dan hasilnya hampir sama dengan durasi injeksi yang diperpendek. Penelitian juga dilakukan oleh Nehmer dan Reitz [5], studi eksperimen tentang pengaruh sistem injeksi bertingkat terhadap emisi NO_x dan soot dengan menggunakan mesin diesel Caterpillar silinder tunggal. Dengan memvariasikan injeksi 10-75 % dari jumlah total bahan bakar, hasilnya emisi NO_x dan soot tereduksi atau berkurang.

Penelitian yang dilakukan Sudarmanta, et al [6] menggunakan mesin Kama type KM 178 FS, menunjukkan bahwa pada pemakaian 100 % biodiesel dapat mengurangi durasi *ignition delay* sampai 4 deg, durasi *premixed combustion* sampai 2 deg, heat release total sampai 26 %, emisi soot sampai 30 % serta meningkatkan durasi *diffusion combustion* sebesar 3 deg dibandingkan dengan *fossil diesel*. Pengukuran unjuk kerja mesin menunjukkan bahwa penambahan persentase biodiesel kedalam campuran bahan bakar menghasilkan penurunan unjuk kerja (torsi, daya, bmep dan efisiensi thermis) 1–3 % dan kenaikan bsfc 2-4 % untuk setiap penambahan 20% biodiesel pada campuran bahan bakar. Pengukuran emisi mesin menunjukkan bahwa penambahan persentase biodiesel kedalam campuran bahan bakar menghasilkan penurunan emisi partikel soot 4–6 % untuk setiap penambahan 20% biodiesel pada campuran. Perubahan derajat waktu injeksi, baik itu *retarded* maupun *advanced* 2^o CA memberikan perubahan (kenaikan ataupun penurunan) terhadap karakterisasi pembakaran, unjuk kerja dan emisi mesin yang lebih besar dibandingkan perubahan *retarded* maupun *advanced* 4^o CA. Saifulloh, [7] melakukan eksperimen berbahan bakar biodiesel kemiri sunan dengan perubahan *camshaft fuel pump* menggunakan mesin Diamond type Di 800. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa modif 2 (2 kali pemompaan) lebih baik dari 1 kali pemompaan, sehingga daya, torsi, bmep, dan efisiensi thermal mengalami kenaikan sedangkan nilai sfc mengalami penurunan.

Permasalahan yang terdapat pada aplikasi sistem injeksi bertingkat saat ini adalah performa yang cenderung menurun pada saat beban rendah dan akselerasi (penambahan kecepatan pada mesin otomotif atau penambahan beban pada mesin stasioner). Untuk meningkatkan performa mesin diesel injeksi bertingkat dibutuhkan pengaturan beberapa parameter dalam penyuplaian bahan bakar biodiesel yang memiliki propertis berbeda dari diesel *fossil*, diantaranya adalah *start of injection* (awal injeksi) dan durasi injeksi bahan bakar. *Start of injection* sangat menentukan

proses pembakaran di dalam silinder sehingga akan mempengaruhi performa dan emisi gas buang yang dihasilkan oleh mesin diesel. Untuk itu, dibutuhkan sudut awal injeksi yang tepat dalam menginjeksikan bahan bakar ke dalam ruang bakar agar didapatkan pembakaran yang sempurna sehingga akan meningkatkan performa mesin dan mengurangi emisi gas buang. Adapun durasi injeksi adalah suatu proses lamanya injektor menginjeksikan bahan bakar ke dalam ruang bakar pada setiap silinder. Lamanya durasi injeksi menentukan jumlah bahan bakar yang disemprotkan ke dalam ruang bakar, pada bahan bakar biodiesel yang mempunyai nilai kalor yang lebih rendah maka perlu dilakukan pengaturan durasi injeksi dari keadaan standarnya.

Berdasarkan uraian di atas, pada penelitian ini akan dilakukan optimasi terhadap performa mesin diesel sistem injeksi bertingkat dengan pengaturan *start of injection* dan durai injeksi sehingga didapatkan performa yang optimal pada setiap kondisi pembebanan mesin. Dalam penelitian ini diharapkan agar mendapatkan sudut *start of injection* dan durasi injeksi yang tepat serta nilai unjuk kerja yang dinyatakan dalam: daya, torsi, *brake mean effective pressure* (BMEP), *specific fuel consumption* (SFC), efisiensi *thermal*, temperatur mesin, temperatur pelumas, temperatur air pendingin, dan temperatur gas buang pada mesin diesel injeksi bertingkat. Pada penelitian ini akan dilakukan pada mesin diesel Diamond tipe Di 800 silinder tunggal yang dirubah sistem injeksinya menggunakan injektor solenoid sehingga injeksinya dapat divariasikan dan dikontrol oleh mekanisme ECU. Pada penelitian ini akan digunakan biodiesel minyak jelantah sebagai bahan bakar yang nantinya dengan pengaturan *start of injection* dan durasi injeksi dapat diketahui bagaimana efeknya terhadap unjuk kerja dan nilai sfc yang dihasilkan sehingga pembentukan kadar polutan gas buang terutama NO_x dapat diminimalisir.

I.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana karakterisasi *properties* biodiesel minyak jelantah.
2. Bagaimana pengaruh biodiesel pada sistem injeksi bertingkat standar (75%-25%) dengan injeksi bertingkat (75%-25%) dengan variasi *start of injection* dan durasi injeksi terhadap unjuk kerja mesin diesel.
3. Bagaimana pengaruh biodiesel pada sistem injeksi bertingkat standar (75%-25%) dengan injeksi bertingkat (75%-25%) dengan variasi *start of injection* dan durasi injeksi terhadap emisi NOx yang dihasilkan.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui karakterisasi *properties* biodiesel minyak jelantah.
2. Untuk mengetahui pengaruh biodiesel pada sistem injeksi bertingkat standar (75%-25%) dengan injeksi bertingkat (75%-25%) dengan variasi *start of injection* dan durasi injeksi terhadap unjuk kerja mesin diesel.
3. Untuk mengetahui pengaruh biodiesel pada sistem injeksi bertingkat standar (75%-25%) dengan injeksi bertingkat (75%-25%) dengan variasi *start of injection* dan durasi injeksi terhadap emisi NOx yang dihasilkan.

I.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Penelitian menggunakan mesin diesel Diamond tipe Di 800 yang dimodifikasi pada bagian injektor agar injeksi dapat dilakukan secara bertingkat.
2. Kondisi mesin diesel dalam keadaan standar.
3. Kondisi udara dalam keadaan ideal.
4. Bahan bakar yang diinjeksikan adalah biodiesel minyak jelantah.

5. Tidak membahas reaksi kimia yang terjadi pada biodiesel.
6. Tidak membahas proses pembuatan ECU.
7. Settingan semprotan injeksi bertingkat pada variasi 75%-25%.

I.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dilaksanakannya penelitian ini adalah hasil yang diperoleh diharapkan :

1. Memberikan analisa atau informasi terhadap karakteristik mesin diesel dengan sistem injeksi bertingkat.
2. Sebagai bahan referensi yang dapat digunakan untuk penelitian berkelanjutan dalam pengembangan bahan bakar dan sistem injeksi pada mesin pembakaran dalam.
3. Mampu memberikan pandangan atau pemikiran tentang teknologi energi terbarukan untuk masyarakat.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1. Teori Dasar Mesin Diesel

Mesin diesel bekerja dengan menghisap udara luar murni, kemudian dikompresikan sehingga mencapai tekanan dan temperatur yang tinggi. Sesaat sebelum mencapai TMA, bahan bakar diinjeksikan dengan tekanan yang sangat tinggi dalam bentuk butiran-butiran halus dan lembut. Kemudian butiran-butiran lembut bahan bakar tersebut bercampur dengan udara bertemperatur tinggi dalam ruang bakar dan menghasilkan pembakaran.

II.1.1. Prinsip Kerja Motor Diesel Empat Langkah

Pada motor diesel empat langkah, satu siklus kerja diselesaikan dalam empat gerakan piston atau dua putaran dari *crankshaft*. Setiap langkah menempuh 180° sehingga dalam satu siklus menempuh 720° putaran *crankshaft*. Berikut ini merupakan prinsip kerja motor diesel empat langkah.

a. Langkah Isap

Berawal dari posisi piston yang berada pada TMA, piston akan bergerak turun dan meningkatkan volume silinder. Pada waktu yang bersamaan katup masuk (*inlet valve*) terbuka sehingga udara masuk ke dalam silinder. Ketika piston berada pada titik mati bawah (TMB), volume silinder berada pada kondisi maksimum, yaitu volume piston ditambah volume kompresi.

b. Langkah Kompresi

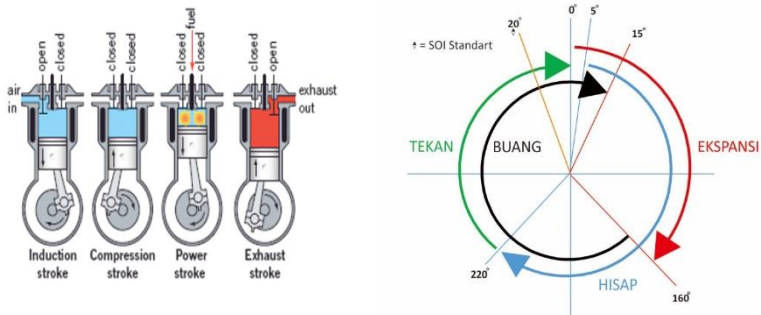
Pada langkah ini, katup masuk dan katup buang (*exhaust valve*) tertutup. Piston bergerak naik dan mengompresi udara yang telah masuk ke dalam silinder hingga mencapai rasio kompresi mesin. Dalam proses ini, temperature udara akan meningkat mencapai 900°C . Ketika langkah kompresi telah selesai, bahan bakar diinjeksikan pada tekanan yang tinggi ke dalam udara terkompresi yang berada dalam temperatur yang tinggi. Ketika piston berada pada posisi TMA, volume silinder yang terbentuk merupakan volume kecil.

c. Langkah Ekspansi

Pada langkah ini, katup masuk dan buang masih tertutup. Pada akhir langkah kompresi pompa bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar dalam bentuk butiran (*droplet*), beberapa derajat sebelum mencapai TMA pada langkah kompresi. Kedua *valve* tertutup. Terjadi *autoignition* akibat gesekan butiran bahan bakar dengan udara panas di ruang bakar. Piston bergerak ke TMB akibat peningkatan volume.

d. Langkah Buang

Sebelum piston berada pada TMB, katup buang terbuka. Panas dan gas hasil pembakaran keluar dari silinder dikarenakan karena adanya gaya yang timbul akibat gerakan piston naik kembali. Pada akhir langkah buang, *crankshaft* telah selesai melakukan dua kali putaran dan siklus dari mesin diesel empat langkah dimulai kembali dari langkah isap.

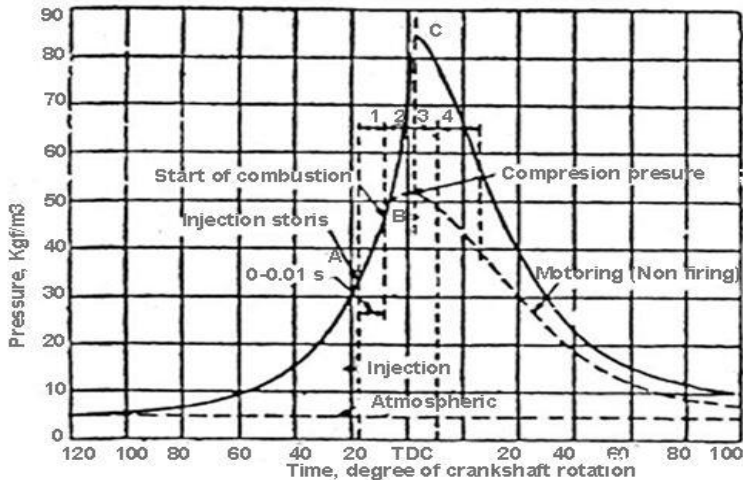


Gambar 2.1 Prinsip kerja dan diagram katup motor diesel empat langkah

II.1.2. Tahapan pembakaran pada Mesin Diesel

Untuk terjadinya pembakaran pada ruang bakar, ada beberapa syarat yang harus dipenuhi, antara lain : adanya campuran yang dapat terbakar, adanya sesuatu yang menyulut terjadinya pembakaran, stabilisasi dan propagasi dari api dalam ruang bakar.

Proses pembakaran pada mesin diesel memiliki beberapa tahapan yang digambarkan dalam diagram P- θ seperti pada Gambar 2.2. Tahapan pembakarannya yaitu [8] :



Gambar 2.2 Tahapan pembakaran pada mesin diesel

a. Tahap Pertama

Tahap ini disebut juga *Ignition Delay Period* yaitu area dalam rentang A-B pada Gambar 2.2. Tahapan ini merupakan periode atau rentang waktu yang dibutuhkan bahan bakar ketika saat pertama kali bahan bakar diinjeksikan (titik A) hingga saat pertamakali muncul nyala pembakaran (titik B). Artinya, selama periode tersebut tidak terjadi proses pembakaran. Panjangnya periode ini biasanya dipengaruhi oleh propertis yang dimiliki bahan bakar yaitu temperatur terbakar sendiri bahan bakar, tekanan injeksi atau ukuran droplet, sudut awal injeksi, rasio kompresi, temperatur udara masuk, temperatur cairan pendingin, temperature bahan bakar, tekanan udara masuk (*supercharge*), kecepatan atau putaran mesin diesel, rasio udara-bahan bakar, ukuran mesin, jenis ruang bakar.

b. Tahap kedua

Pada tahap ini terjadi apa yang disebut *Rapid or Uncontrolled Combustion* yang maksudnya adalah periode awal pembakaran hingga *flame* mulai berkembang yang diindikasikan

oleh area B-C pada Gambar 2.2. Bahan bakar berupa droplet-droplet di selubungi oleh udara bertemperatur tinggi, sehingga panas yang diterima akan menguapkan droplet-droplet bahan bakar tersebut. Bagian terluar droplet-droplet tersebut yang lebih dulu menerima panas dan menguap kemudian terbakar. Panas yang ditimbulkan oleh pembakaran tersebut naik sangat drastis dan memicu proses yang sama pada bagian lain yang belum terbakar dengan cepat dan tidak beraturan. Proses ini menyebabkan kenaikan tekanan yang sangat besar.

c. Tahap ketiga

Pada tahap ini terjadi apa yang disebut *Controlled Combustion* seperti diindikasikan oleh area C-D pada Gambar 2.2, dimana bahan bakar segera terbakar setelah diinjeksikan. Hal ini disebabkan nyala pembakaran yang terjadi pada periode sebelumnya bergerak bersama menuju droplet-droplet yang baru diinjeksikan. Pembakaran dapat dikontrol dengan sejumlah bahan bakar yang diinjeksikan pada periode ini. Periode ini berakhir setelah injektor berhenti menginjeksikan bahan bakar ke ruang bakar.

d. Tahap keempat

Meskipun pada tahap ketiga telah selesai proses injeksi bahan bakar, kenyataannya masih ada bahan bakar yang belum terbakar seluruhnya. Dalam hal ini nyala pembakaran terus berkembang membakar bahan bakar yang tersisa pada ruang bakar. Periode ini disebut juga *afterburning* yang diindikasikan oleh area setelah titik D pada Gambar 2.2. Apabila kenyataannya masih ada bahan bakar yang belum terbakar sementara piston telah bergerak dari Titik Mati Bawah (TMB) ke Titik Mati Atas (TMA) untuk melakukan langkah buang, maka sisa-sisa bahan bakar tersebut akan ikut keluar bersama gas buang sebagai *unburnt fuel*.

II.2. Unjuk Kerja Mesin Diesel

Karakteristik operasi dan unjuk kerja dari mesin diesel biasanya berhubungan dengan:

II.2.1 Daya

Daya mesin merupakan daya yang diberikan untuk mengatasi beban yang diberikan. Daya yang dihasilkan pada mesin diesel yang dikopel dengan generator listrik dapat dihitung berdasarkan beban pada generator listrik dan dinyatakan sebagai daya efektif pada generator (Ne). Hubungan tersebut dinyatakan dengan rumus:

$$Ne = \frac{V \times I \times \cos \varphi}{\eta_{generator} \times \eta_{transmisi}} \quad (2.1)$$

Keterangan :

- Ne : Daya mesin (Watt)
- V : Tegangan listrik (Volt)
- I : Arus listrik (Ampere)
- η_{gen} : Efisiensi mekanisme generator (0,9)
- η_{transm} : Efisiensi transmisi (0,95)
- $\cos \theta$: Faktor daya listrik ($\cos \varphi$) = 1

II.2.2 Torsi

Torsi merupakan ukuran kemampuan mesin untuk menghasilkan kerja. Dalam prakteknya, torsi dari mesin berguna untuk mengatasi hambatan sewaktu berkendara. Momen torsi dihitung dengan persamaan seperti berikut:

$$Mt (Nm) = \frac{Ne (\cancel{watt})}{n (\cancel{rev/min})} \times \frac{1 \cancel{J}}{1 \cancel{W} \cdot s} \times \frac{60 \cancel{s}}{1 \cancel{min}} \times \frac{1 \cancel{rev}}{2\pi} \times \frac{1 Nm}{1 \cancel{J}}$$

$$Mt (Nm) = \frac{Ne}{n} \quad (2.2)$$

Keterangan :

- Mt = Torsi ($N \cdot m$).
- Ne = Daya (Watt).
- n = Putaran mesin (rev / min)

Dari persamaan tersebut, torsi sebanding dengan daya yang diberikan dan berbanding terbalik dengan putaran mesin. Semakin besar daya yang diberikan mesin, maka torsi yang dihasilkan akan

mempunyai kecenderungan untuk semakin besar. Semakin besar putaran mesin, maka torsi yang dihasilkan akan semakin kecil.

II.2.3 Tekanan Efektif Rata-Rata (*b MEP*)

Proses pembakaran campuran udara-bahan bakar menghasilkan tekanan yang bekerja pada piston sehingga melakukan langkah kerja. Besarnya tekanan ini berubah-ubah sepanjang langkah piston tersebut. Bila diambil tekanan yang berharga konstan yang bekerja pada piston dan menghasilkan kerja yang sama, maka tekanan tersebut dikatakan sebagai kerja per siklus per volume langkah piston. Tekanan efektif rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang volume langkah piston sehingga menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya efektif.

Perumusan *b MEP* adalah :

$$\begin{aligned}
 b_{MEP} &= \frac{N_e (W) \cdot z}{V (m^3) \cdot n (rev/min) \cdot i} \\
 b_{MEP} &= \frac{W}{m^3 \cdot \frac{rev}{min}} \times \frac{1 rev}{2\pi} \times \frac{60s}{1 min} \times \frac{1 J}{1 W \cdot s} \times \frac{1 Nm}{1 J} \\
 b_{MEP} &= \frac{N}{m^2} \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

Keterangan :

N_e = Daya poros mesin (W).

V = Volume silinder (m^3).

i = Jumlah silinder.

n = Putaran mesin diesel (rev/min).

z = jumlah putaran dalam satu siklus langkah kerja, 1 (mesin 2 langkah) atau 2 (mesin 4 langkah).

II.2.4 *Specific Fuel Consumption (Sfc)*

Specific fuel consumption (Sfc) adalah jumlah bahan bakar yang dipakai mesin untuk menghasilkan daya efektif 1 (satu) *hp* selama 1 (satu) jam. Apabila dalam pengujian diperoleh data mengenai penggunaan bahan bakar m (kg) dalam waktu s (detik) dan

daya yang dihasilkan sebesar *bhp* (*HP*) maka pemakaian bahan bakar perjam \dot{m}_{bb} adalah :

$$\dot{m}_{bb} = \frac{m_{bb}}{s} \frac{kg}{sekon} \quad (2.4)$$

Sedangkan besarnya pemakaian bahan bakar spesifik adalah:

$$sfc = \frac{3600 \times \dot{m}_{bb}}{Ne} \frac{kg}{Watt} \quad (2.5)$$

Keterangan :

m_{bb} : Massa bahan bakar biodiesel yang dikonsumsi mesin (kg)

\dot{m}_{bb} : Pemakaian bahan bakar biodiesel per jam (kg/sekon)

s : Waktu konsumsi bahan bakar (s)

II.2.5 Efisiensi termal (η_{th})

Efisiensi termal adalah ukuran besarnya pemanfaatan energy panas yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh mesin pembakaran dalam. Secara teoritis dituliskan dalam persamaan :

$$\eta_{th} = \frac{\text{daya efektif yang dihasilkan}}{\text{Energi panas bahan bakar per satuan waktu yang diberi}} \times 100\%$$

$$\eta_{th} = \frac{Ne}{sfc \times NKB} \times 100\% \quad (2.6)$$

Keterangan :

Sfc = Konsumsi bahan bakar spesifik (kg/hp.jam)

Q = Nilai kalor bawah (*low heat value, LHV*) atau panas pembakaran bahan bakar (kkal/kg bahan bakar).

II.2.6 Emisi gas buang

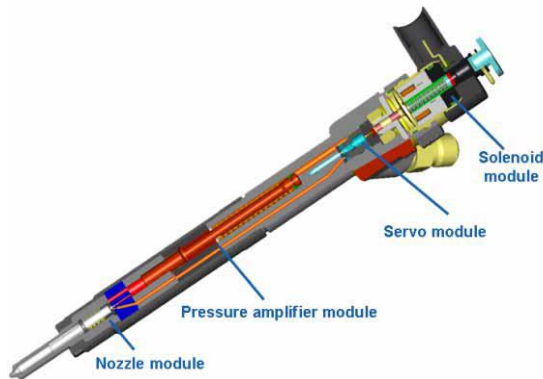
Polusi udara oleh gas buang dan bunyi pembakaran mesin diesel adalah gangguan lingkungan. Komponen-komponen gas buang yang berbahaya antara lain adalah asap hitam (angus), hidro karbon yang tidak terbakar (UHC), karbon monoksida (CO), oksida nitrogen (NO), dan NO₂. NO dan NO₂ biasa di sebut NO_x. Faktor yang menyebabkan terbentuknya jelaga atau angus pada gas buang motor diesel adalah :

- Bahan bakar yang disemprotkan ke dalam ruang bakar terlalu banyak
- Karena *engine* bekerja pada putaran tinggi sehingga tidak mempunyai cukup waktu untuk bercampurnya bahan bakar dengan udara secara sempurna.

II.3 Injektor

Injektor merupakan alat yang dipasang baik pada intake manifold pada *non direct injection* ataupun langsung pada ruang bakar pada sistem *direct injection* yang fungsinya seperti kontrol suplai bahan bakar.

Fungsi utama dari injektor adalah untuk mengkabutkan bahan bakar baik bermekanisme mekanis maupun elektronik. Dengan adanya injektor, maka bahan bakar yang dikabutkan membuat proses pembakaran menjadi sempurna karena mengubah fase dari *liquid* hingga menjadi kabut atau mendekati fase gas. Injektor terdiri dari bagian yang berbeda beda, antara lain adalah filter, solenoid, *needle valve*, dan soket elektrik. Struktur injektor elektrik dapat dilihat pada Gambar 2.3



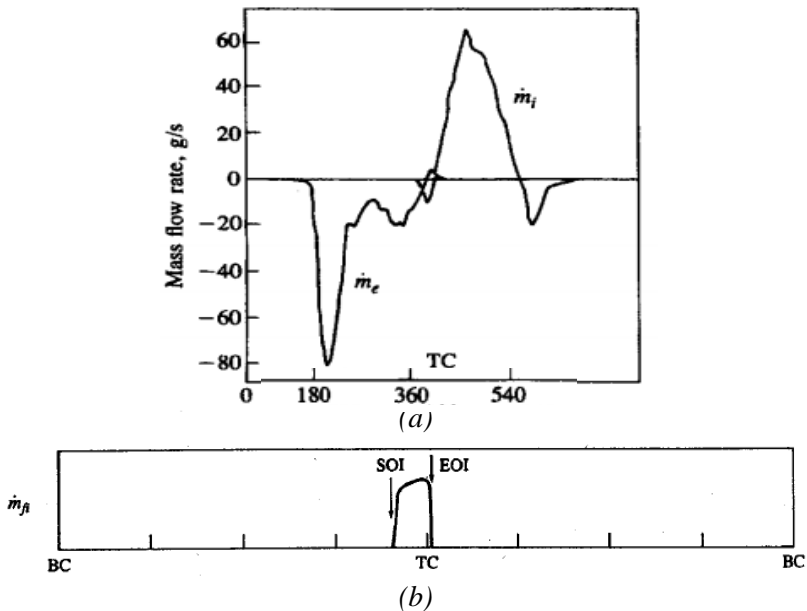
Gambar 2.3 Struktur dan bagian dari injektor bersolenoid [11]

Nosel atau injektor tergolong NC (*Normally Closed*) dan membuka ketika akan menyemprotkan bahan bakar yang bertekanan 200 bar selama ada arus listrik yang menyuplai koil solenoidnya. Durasi tutup-buka-tutup, dinamakan lebar pulsa (*pulse width*) sebanding dengan bahan bakar yg diinginkan. Pulsa elektrik diselaraskan pada sekuen buka tutup katub pada setiap masing-masing individu piston atau grup piston. Proses kontrol buka tutup injektor dikontrol oleh ECU. Ketika ECU memerintahkan injektor membuka, maka ECU mengirim sinyal berupa voltase. Voltase yang dikirim akan mengaktifkan mekanisme solenoid yang berupa rangkaian elektronik coil winding. Coil winding nanti akan menghasilkan medan magnet yang akan mendorong pintle menjauh dari pintle seat sehingga bahan bakar dapat mengalir keluar dari injektor. Pada injektor juga terdapat pintle cap yang bertujuan untuk melindungi injektor dari panas yang ditimbulkan mesin.

II.3.1 Profil Udara Masuk Dan Laju Aliran Bahan Bakar Menurut Heywood

Pada gambar (a) yang menunjukkan profil *massflowrate* udara masuk ke ruang bakar (*m_i*) pada langkah hisap dan udara *exhaust* pada langkah buang (*m_e*). Grafik ini dihasilkan pada

pengoperasian mesin empat langkah penyalan busi pijar, pada putaran konstan 1500 rpm, *throttle* terbuka total. Pada grafik dapat dilihat bahwa daya hisap maksimal atau induksi maksimal terjadi pada nilai tengah antara 360° - 540° CA, kemudian terjadi penurunan sampai nilai nol (0) pada beberapa derajat sebelum 540° CA atau mendekati akhir langkah hisap. Pada gambar (b) dapat diketahui bahwa pada *start of injection* (SOI) laju aliran massa bahan bakar mulai diinjeksikan pada tekanan tertentu dan kemudahan massa aliran bahan bakar mulai menurun pada saat *end of injection* (EOI)



Gambar 2.4 (a) Grafik *Mass Flow Rate* Udara Masuk dan *Exhaust* Terhadap *Crank angle*. (b) *Fuel Mass Flow Rate*. [14]

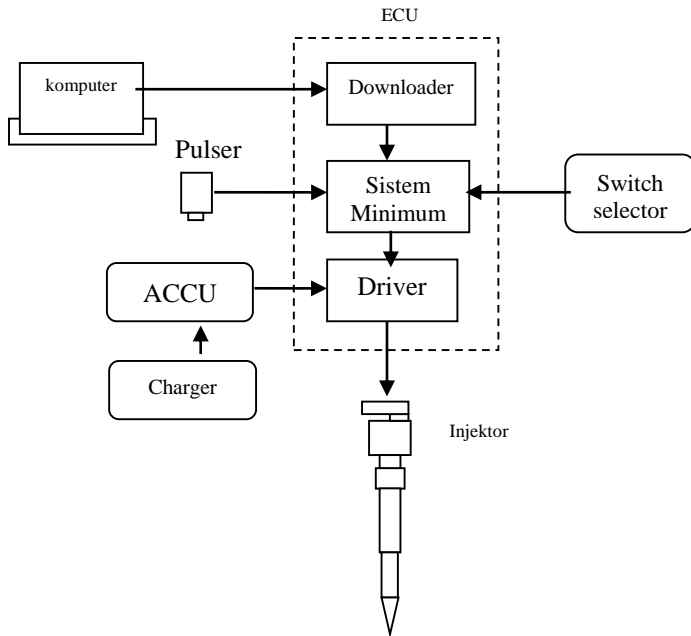
II.4 Sistem Injeksi Bertingkat

Sistem injeksi bertingkat merupakan sistem injeksi pada injektor dengan dua kali penyemprotan yang dipasang pada mesin

diesel dan dapat divariasikan saat pengontrolan semprotan pada *injection nozzle* [2]. Penggunaan sistem injeksi bertingkat sudah diaplikasikan pada mesin diesel dan sudah beredar dipasaran yang semakin tahun terus dikembangkan. Tujuan dari sistem injeksi bertingkat adalah untuk mengurangi terjadinya penumpukan bahan bakar pada ruang bakar yang dapat berakibat terjadi pembakaran secara serentak karena kenaikan tekanan yang spontan.

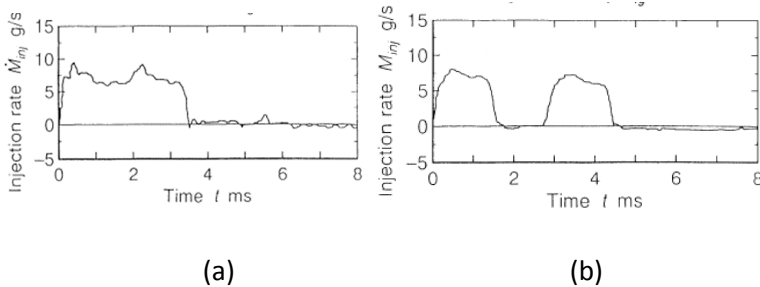
II.4.1 Karakteristik ECU Dan Karakteristik Injeksi Satu Tingkat Maupun Dua Tingkat

Pada penelitian ini peranan ECU sangat dibutuhkan dalam mengatur sistem kerja solenoid injektor. Dimana sistem kerja ECU adalah mengatur timing bukaan injektor dan mengatur prosentase *timing* waktu injeksi bertingkat berdasarkan inputan berupa sensor posisi poros engkol yaitu pulser dan *switch selector* sebagai tombol pemilih variasi injeksi dan accu sebagai sumber tegangan listrik. Sistem pada ECU dibagi dalam 3 bagian yaitu *downloader*, sistem minimum dan *driver*. *Downloader* bertugas menghubungkan ECU dengan komputer sehingga dapat di inputkan program dari komputer ke ECU. Sistem minimum adalah pusat kerja dari ECU yakni memproses logika data yang telah diinputkan dengan mengacu pada inputan lain berupa pulser dan *switch selector* yang kemudian memberikan output berupa sinyal pada *driver*. Pada *driver* sinyal inputan dari sistem minimum dinaikkan tegangannya karena spesifikasi kerja injektor yang membutuhkan tegangan listrik yang besar.



Gambar 2.5 Skema ECU

Pada proses injeksi satu tingkat (a) menurut Kenji A. dan Yukihiro Hashimoto fenomena penelitian yang dilakukan pada pengaturan waktu 3 – 4 ms sesudah *start of injection* menghasilkan kondisi *injection rate* 8-10 g/s . Dikarenakan udara pada temperatur lingkungan sekitar relatif lebih rendah 550°C sehingga perbandingan bahan bakar dan udara yang masuk didalam ruang bakar tidak sesuai. Pada injeksi dua tingkat (b) pada semprotan yang kedua menghasilkan kondisi *injection rate* 8-10 g/s dengan kondisi yang sama pada injeksi yang pertama. Kemudian injeksi yang kedua mempunyai durasi waktu jeda (*dwelltime*) 1,3 ms dan pada *ignition delay* 4,5 ms karakteristik injeksi dua tingkat bekerja.



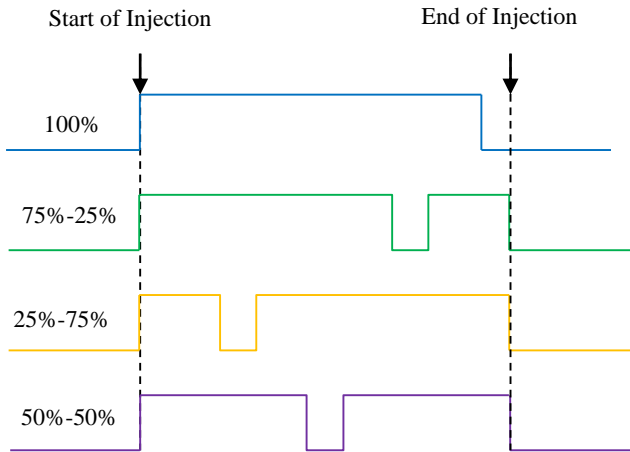
Gambar 2.6 (a) Karakteristik Injeksi Satu tingkat (b) Karakteristik Injeksi Dua Tingkat

II.4.2 Penerapan Teknologi Injeksi Bertingkat

Penggunaan teknologi injeksi bertingkat sebenarnya sudah dilakukan lebih dahulu pada mesin bensin dengan sistem injeksi EFI sejak tahun 1980an. Pada diesel injeksi bertingkat diaplikasikan pada sistem diesel Commonrail. Prinsip EFI dan Commonrail sangat mirip yakni suplai bahan bakar diatur secara elektronik. Yang membedakan adalah pada tekanan pompa bahan bakarnya yang pada EFI bensin tekanan bensin hanya 3,5-5 bar sedangkan pada commonrail solar bisa ditekan hingga 1600 bar. Pada teknologi injeksi bertingkat mutlak diperlukan injektor bersolenoid agar bisa melakukan proses injeksi hingga 5 kali dalam 1 siklus.

Dari penelitian sebelumnya yang sudah dilakukan pada dengan mesin diesel Diamond tipe Di 800 yang dilakukan oleh Hardiyanto [16] dengan injeksi dua tingkat yaitu settingan durasi bukaan injektor selama 10ms dilakukan settingan pada ECU untuk sistem injeksi bertingkat 75% - 25%, 50% - 50%, dan 25% - 75%. Pada settingan 75% - 25% pada injeksi yang pertama injektor diatur agar membuka selama 7,5 ms kemudian injeksi yang kedua selama 2,5 ms sedangkan jeda (*dwell time*) yang digunakan adalah selama 1ms. Pada Settingan 50% - 50% dan 25% - 75% juga dilakukan hal yang sama dengan memberikan jeda (*dwell time*) selama 1ms.

Skema durasi injeksi bertingkat 75% - 25%, 50% - 50%, dan 25% - 75%.



Gambar 2.7 Proses Skema Injeksi Bertingkat Pada Penelitian Sebelumnya [16]

II.4.3 Keunggulan Sistem Injeksi Bertingkat

Beberapa kelebihan yang diperoleh dengan mengaplikasikan injeksi bertingkat adalah:

1. Memperbaiki kualitas pembakaran
Pada injeksi multi tingkat injeksi pilot dimaksudkan agar memberi waktu untuk tercampurnya antara bahan bakar dan udara sehingga kualitas pembakaran menjadi lebih baik.
2. Mengurangi getaran dan kebisingan
Pada langkah Pre-injeksi membuat pendek *ignition delay* pada *main injection* sehingga mengurangi terbentuknya NOx, getaran dan kebisingan.
3. Mengurangi polusi gas buang
Polusi gas buang yang timbul akibat suplai bahan bakar yang tidak akurat bisa diminimalisir.

II.4.4 Kekurangan Sistem Injeksi Bertingkat

Dalam aplikasi penggunaan electronic fuel injection, terdapat beberapa pertimbangan yang menyebabkan teknologi tersebut kurang dipilih sebagai sistem suplai bahan bakar pada mesin diesel. Beberapa kekurangan yang dapat menjadi penyebabnya adalah:

1. Faktor desain dan produksi
Menerapkan injeksi bertingkat berarti mengaplikasi sistem EFI pada mesin diesel yang menyebabkan sistem distribusi solar menjadi semakin rumit dan biaya produksi untuk parts yang mendukung sistem EFI semakin mahal membuat harganya menjadi melonjak.
2. Faktor perawatan
Biaya perawatan lebih mahal karena diperlukan komponen yang semakin rumit dan sistem elektronik yang kompleks membuat proses perawatan menjadi rumit.
3. Faktor *Value for Money*
Pada mesin diesel putaran rendah dan kapasitas kecil, efisiensi yang dihasilkan oleh EFI dirasa kurang sebanding dengan biaya yang diperlukan untuk mengaplikasikannya. Injeksi konvensional masih dirasa cukup memadai dalam mensuplai bahan bakar pada mesin diesel tersebut.

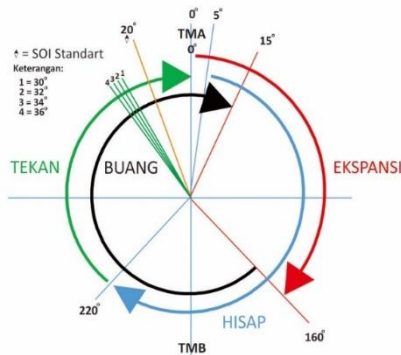
II.5. Pengaruh *Start of Injection* terhadap Performa Mesin

Start of injection (awal injeksi) atau waktu injeksi adalah titik awal atau sudut saat penyalaan pembakaran pada mesin diesel dengan jalan menginjeksikan bahan bakar langsung ke dalam ruang bakar (*direct injection*) atau melalui *intake manifold* (*indirect injection*). *Start of injection* sangat menentukan proses pembakaran di dalam silinder sehingga akan mempengaruhi performa dan emisi gas buang yang dihasilkan oleh mesin diesel termasuk yang menggunakan injeksi bertingkat. Untuk itu, dibutuhkan sudut *start of injection* yang tepat dalam menginjeksikan bahan bakar kedalam

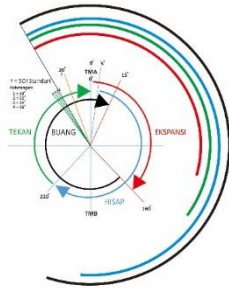
ruang bakar agar didapatkan pembakaran yang sempurna sehingga dapat meningkatkan performa dan mengurangi emisi gas buang [17].

II.6 Durasi Injeksi

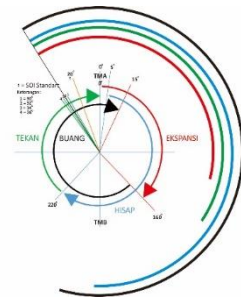
Durasi injeksi (*duration of injection*) adalah suatu proses lamanya injektor menginjeksikan bahan bakar ke dalam ruang bakar pada setiap silinder. Lamanya durasi injeksi menentukan jumlah bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar dan pada bahan bakar biodiesel yang mempunyai nilai kalor yang rendah, maka perlu dilakukan pengaturan durasi injeksi dari keadaan standarnya. Selain itu, biodiesel mempunyai angka setana yang lebih tinggi dibandingkan *fossil diesel* sehingga memerlukan *ignition delay period* yang lebih pendek. Hal ini dapat meningkatkan performa mesin yang lebih optimal dibandingkan saat menggunakan pengaturan standar.



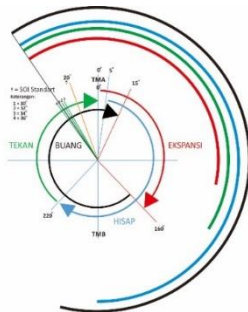
Gambar 2.8 Diagram katup dengan variasi *Start of Injection*



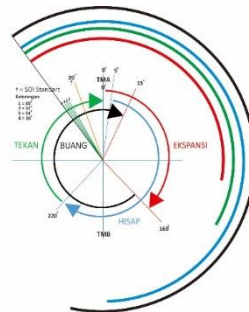
Gambar 2. 1 *Start of Injeksi*
Pada 10° CA BTDC, DI
sebesar 13, 15, 17, 19 ms.



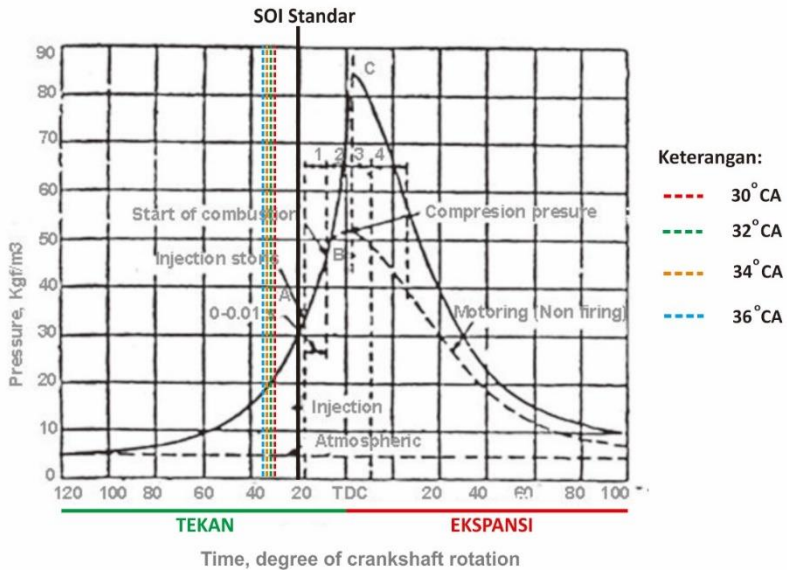
Gambar 2. 2 *Start of Injeksi*
Pada 12° CA BTDC, DI
sebesar 13, 15, 17, 19 ms.



Gambar 2. 31 *Start of Injeksi*
Pada 14° CA BTDC, DI
sebesar 13, 15, 17, 19 ms.



Gambar 2. 42 *Start of Injeksi*
Pada 16° CA BTDC, DI
sebesar 13, 15, 17, 19 ms.



Gambar 2.13 Grafik Tekanan Terhadap Derajat *Crank Angle*

Penentuan *start of injection* biodiesel didasarkan pada kondisi aktual durasi efektif katup udara masuk terbuka pada mesin diesel yang digunakan, yaitu: dari 15° - 220° CA, serta daya induksi maksimal pada nilai tengah langkah piston dari TMA ke TMB. *Start of injection* biodiesel dimulai pada 10°, 12°, 14°, 16° *crank angle* (CA) *before top dead center* (BTDC), serta durasi injeksi sebesar 13, 15, 17, 19 *milisecond*.

II.7 Bahan Bakar

Bahan bakar solar adalah bahan bakar hasil yang di peroleh dari destilasi pendidihan minyak mentah (*crude oil*) pada suhu 250 °C sampai 370 °C dengan jumlah atom karbon bervariasi mulai 14 sampai 18. Bahan bakar ini berwarna coklat kuning jernih.

Properti bahan bakar adalah sifat atau karakter yang dimiliki oleh suatu bahan bakar yang terkait dengan kinerja bahan bakar

tersebut dalam proses atomisasi dan pembakaran. Properti umum yang perlu diketahui untuk menilai kinerja bahan bakar mesin diesel antara lain:

a. Densitas, Specific Gravity dan API Gravity

Densitas didefinisikan sebagai perbandingan berat per satuan volume dari suatu zat atau bahan tertentu pada suhu acuan 15°C. Sedangkan *specific gravity (SG)* adalah perbandingan berat dari sejumlah volume minyak bakar terhadap berat air untuk volume yang sama pada suhu tertentu densitas bahan bakar, relatif terhadap air. *Specific gravity* dinyatakan dalam persamaan:

$$SG_{\text{terhadap air}} = \frac{\text{densitas}_{\text{bahan bakar}}}{\text{densitas}_{\text{air}}} \quad (2.7)$$

Sementara hubungan nilai *Specific Gravity* dengan *API Gravity* adalah sebagai berikut:

$$API \text{ Gravity} = \frac{141,5}{SG} - 131,5 \quad (2.8)$$

b. Viskositas

Viskositas atau kekentalan dari suatu cairan adalah salah satu sifat cairan yang menentukan besarnya perlawanan terhadap gaya geser. Viskositas terjadi terutama karena adanya interaksi antara molekul-molekul cairan. Viskositas merupakan sifat penting dalam penyimpanan dan penggunaan bahan bakar. Viskositas mempengaruhi derajat pemanasan awal yang diperlukan untuk *handling*, penyimpanan dan atomisasi yang memuaskan dan jika viskositas terlalu tinggi maka akan menyulitkan dalam pemompaan dan sulit untuk diinjeksi sehingga atomisasi bahan bakar menjadi buruk.

c. Flash Point

Flash point atau titik nyala adalah suatu angka yang menyatakan temperatur terendah dari bahan bakar minyak dimana akan timbul penyalan api sesaat, apabila pada permukaan minyak

tersebut didekatkan pada nyala api. *Flash point* mengindikasikan tinggi rendahnya volatilitas dan kemampuan untuk terbakar dari suatu bahan bakar.

d. *Pour Point*

Pour point atau titik tuang adalah suatu angka yang menyatakan suhu terendah dari bahan bakar minyak sehingga minyak tersebut masih dapat mengalir karena gaya gravitasi. Ini merupakan indikasi yang sangat kasar untuk suhu terendah dimana bahan bakar minyak siap untuk dipompakan.

e. *Sulphur content*

Sulphur content atau kandungan belerang dalam bahan bakar diesel dari hasil penyulingan sangat tergantung pada asal minyak mentah yang akan diolah. Keberadaan belerang tidak diharapkan karena sifatnya merusak yaitu apabila oksida belerang kontak dengan air merupakan bahan yang korosif terhadap logam di ruang bakar. Hal lain yang lebih penting adalah timbulnya polusi bagi lingkungan hidup yang merupakan hasil pembakaran.

f. *Distillation*

Karakteristik destilasi dari bahan bakar menunjukkan kemampuan bahan bakar berubah menjadi uap pada temperatur tertentu.

g. *Cetane number*

Cetane number atau angka setana menunjukkan kemampuan bahan bakar untuk menyala sendiri (*auto ignition*). Skala untuk angka setana biasanya menggunakan referensi berupa campuran antara normal setana ($C_{16}H_{34}$) dengan *alpha methyl naphthalene* ($C_{10}H_7CH_3$) atau dengan *heptamethylnonane* ($C_{16}H_{34}$). Normal setana memiliki angka setana 100, *alpha methyl naphthalene* memiliki angka setana 0, dan *heptamethylnonane* memiliki angka setana 15. Angka setana suatu bahan bakar biasanya didefinisikan sebagai persentase volume dari normal setana dengan campurannya tersebut.

Angka setana yang tinggi menunjukkan bahwa bahan bakar dapat menyala pada temperatur yang relatif rendah, dan sebaliknya angka setana rendah menunjukkan bahan bakar baru dapat menyala

pada temperatur yang relatif tinggi. Penggunaan bahan bakar mesin diesel yang mempunyai angka setana yang tinggi dapat mencegah terjadinya *knocking* karena begitu bahan bakar diinjeksikan ke dalam silinder pembakaran, maka bahan bakar akan langsung terbakar dan tidak terakumulasi.

h. Calorific value

Calorific value atau nilai kalor merupakan suatu angka yang menyatakan jumlah energi panas maksimum yang dibebaskan oleh suatu bahan bakar melalui reaksi pembakaran sempurna persatuan massa atau volume bahan bakar tersebut. Nilai kalor dinyatakan dalam 2 ukuran besaran, yaitu nilai kalor atas, NKA (jika air hasil pembakaran dalam phase cair) dan nilai kalor bawah, NKB (jika air hasil pembakaran dalam phase uap). Besarnya nilai kalor atas diuji dengan *bomb calorimeter*, dan nilai kalor bawah dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$NKB = NKA - \left(\frac{m_{H_2O}}{m_{sample}} \times LH \right) \quad (2.9)$$

i. Carbon residue

Adanya *carbon residue* atau residu karbon dalam ruang pembakaran dapat mengurangi kinerja mesin. Pada temperatur tinggi deposit karbon ini dapat membara, sehingga menaikkan temperatur silinder pembakaran. Banyaknya deposit atau kerak yang ada di ruang bakar mengindikasikan tingginya kandungan residu karbon dari suatu bahan bakar.

j. Ash content

Ash content atau kadar abu adalah jumlah sisa-sisa dari minyak yang tertinggal apabila suatu minyak dibakar sampai habis. Kadar abu erat kaitannya dengan bahan inorganik atau garam dalam bahan bakar minyak. Garam-garam tersebut mungkin dalam bentuk senyawa sodium, vanadium, kalsium, magnesium, silicon, besi, aliminium, nikel, dll.

Properti umum bahan bakar solar ditunjukkan pada tabel 2.1.

Table 2.1 *Properties* bahan bakar solar. [12]

No.	Properties	Unit	Limit	
			Min	Max
1.	Density pada 15 °C	kg/m ³	815	870
2.	Angka Setana	-	45	-
3.	Index Cetane	-	48	-
4.	Visc. Kinematik pada 40 °C	mm ² /sec	2.0	5.0
5.	Titik Didih	°C	-	18
6.	Titik Nyala	°C	60	-
7.	Distilasi: T95	°C	-	370
8.	Kandungan Belerang	% massa	-	0.35
9.	Korosi Copper	Merit	-	No. 1
10.	Residue Konradson Carbon	Merit	-	No. 1
11.	Kandungan Abu	% m/m	-	0.01
12.	Kandungan Air	Mg/kg	-	500
13.	Partikulat	Mg/l	-	0.01
14.	Angka Asam Kuat	mgKOH/g	-	-
15.	Total Asam Kuat	mgKOH/g	-	0.6
17.	Warna	No. ASTM	-	3.0
18.	API Gravity pada 15 °C	-	-	-

II.8 Biodiesel

Biodiesel merupakan bahan bakar yang terbuat dari minyak tumbuh-tumbuhan atau lemak hewan. Komposisi biodiesel umumnya terdiri dari berbagai jenis asam lemak yang melalui proses kimiawi ditransformasi menjadi "Metil Ester Asam Lemak" (*Fatty Acid Methyl Esters* = FAME). Biodiesel adalah sama halnya dengan biopetrol namun cairan yang di peroleh dari hasil pembuatan mempunyai rantai karbon yang lebih panjang dibandingkan solar. Bentuknya yang cair dan kemampuan untuk dicampurkan dengan solar pada segala perbandingan merupakan keunggulan biodiesel.

Agar dapat digunakan sebagai bahan bakar pengganti solar, biodiesel harus mempunyai kemiripan sifat fisik dan kimia dengan minyak solar. Salah satu sifat fisik yang penting adalah viskositas. Minyak lemak nabati yang dijadikan bahan bakar, viskositasnya terlalu tinggi sehingga tidak memenuhi persyaratan untuk dijadikan bahan bakar mesin diesel.

Table 2.2 *Properties* biodiesel standart SNI 04-7182 tahun 2012

No.	Properties dan Unit	Nilai Limit	Pengujian
1.	Density pada 40 °C, kg/m ³	850-890	ASTM D 1298
2.	Angka Setana	Min. 51	ASTM D 613
3.	Visc. Kinematik pada 40 °C, mm ² /sec	2,3-6,0	ASTM D 445
5.	Titik Keruh, °C	Max. 18	ASTM D 2500
6.	Titik Nyala, °C	Min. 100	ASTM D 93
7.	Distilasi pada temperature 90 %, °C	Max. 360	ASTM D 1160
8.	Korosi Copper, 3 jam 50 °C	Max. no. 3	ASTM D 130
9.	Residue Konradson Carbon, %-b (Desitilasi 10 %)	Max. 0,3	ASTM D 4530
10.	Residue Konradson Carbon, %-b (Sampel asli)	Max. 0,05	ASTM D 4530
11.	Kandungan Abu, %-b	Max. 0,02	ASTM D 874
12.	Kandungan Air dan Sedimen, %-vol	Max. 0,05	ASTM D 2079
13.	Fosfor, mg/kg	Max. 10	AOCS Ca 12-55

14.	Angka asam, mg-KOH/g	Max. 0,6	ASTM D 664
15.	Gliserol bebas, %-massa	Max. 0,02	ASTM D 6584
16.	Gliserol total, %-massa	Max. 0,24	ASTM D 6584
17.	Belerang, mg/kg	Max. 100	ASTM D 5453
18.	Angka Iodium, %-massa	Max. 115	AOCS Cd- 125

II.8.1 Minyak Jelantah

Minyak goreng bekas atau yang sering disebut dengan minyak jelantah adalah limbah yang berasal dari minyak nabati yang telah digunakan beberapa kali sehingga merubah susunan komposisi didalamnya. Ciri fisiknya adalah warna coklat kehitaman dan biasanya terdapat kotoran-kotoran kecil sisa penggorengan. Walaupun warnanya sudah sangat pekat karena sering digunakan, namun minyak jelantah masih bisa dimanfaatkan. Minyak jelantah tersebut dapat digunakan sebagai substrat untuk energi biodiesel yang dapat menghidupkan mesin diesel tanpa atau tidak dengan substitusi solar. Hal ini dikarenakan minyak jelantah terlebih dahulu diperbaiki melalui proses transesterifikasi.

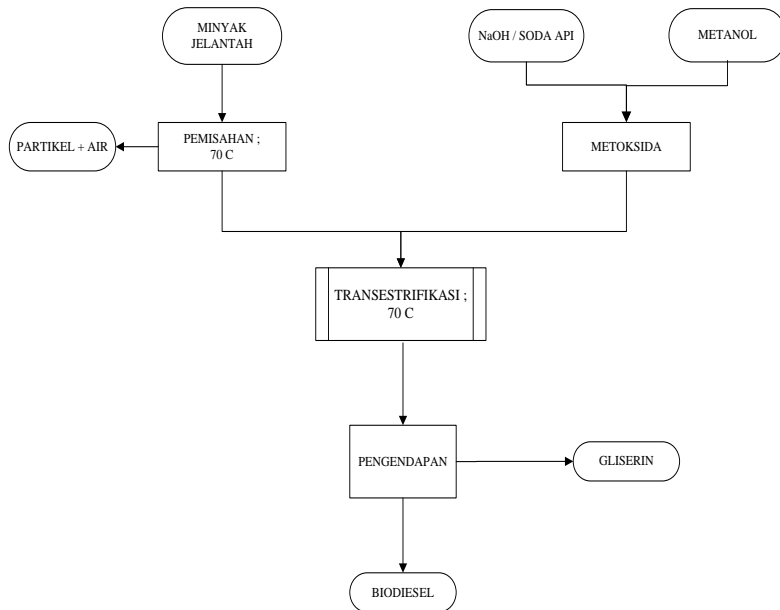
Biodiesel yang berasal dari minyak jelantah sifatnya ramah lingkungan, tidak mencemari air, udara, maupun tanah karena mudah terurai secara biologis dan bahan bakunya dapat diperbaharui. Pemakaian minyak jelantah sebagai bahan baku pembuatan biodiesel dapat meminimalisir pencemaran lingkungan akibat limbah minyak goreng yang berasal dari industri pabrik maupun rumah tangga. Dengan memakai limbah minyak goreng tersebut, juga dapat mereduksi biaya produksi biodiesel yang tergolong mahal, dikarenakan terbatasnya ketersediaan bahan baku dan harganya yang relatif tinggi.



Gambar 2.14 Minyak Jelantah

II.8.2 Cara Pembuatan Biodiesel Minyak Jelantah

Cara memproduksi biodiesel dapat dilakukan melalui proses transesterifikasi minyak nabati dengan metanol atau esterfikasi langsung asam lemak hasil hidrolisis dengan metanol. Namun, proses transesterifikasi lebih intensif dikembangkan karena proses ini lebih efisien dan ekonomis. Berikut ini adalah bagan pembuatan biodiesel minyak jelantah :

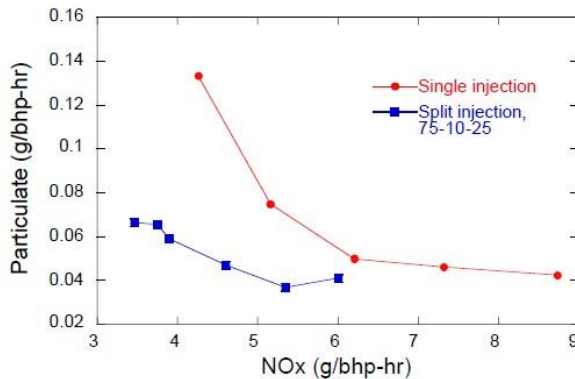


Gambar 2.15 Flowchart pembuatan biodiesel

II.9 Penelitian Terdahulu

1. Zhiyu Han, et al

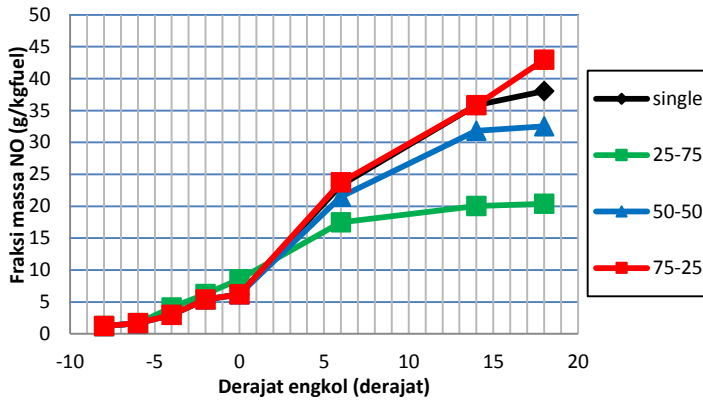
Sebuah studi numerik Zhiyu Han, Ali Uludogan, Gregory J Hampson, dan Rolf D. Reitz yang berjudul *Mechanism of Soot and NO_x Emission Reduction Using Multiple Injection in a Diesel Engine* dari data komputasi menunjukkan bahwa dengan pre injeksi dengan 25 % dari total bahan bakar yang disemprotkan dalam 1 siklus secara signifikan mampu mengurangi produksi soot tanpa menambah persentase produksi NO_x pada level yang signifikan. Ditampilkan oleh komputasi bahwa soot emission dapat dikurangi dengan injeksi split (pre injeksi) dan split injeksi juga membuat injeksi timing dapat dimundurkan sehingga dapat mengurangi emisi NO_x. Dengan memadukan split injection dan memundurkan timing injeksi bahan bakar maka baik soot dan NO_x dapat secara signifikan dikurangi secara simultan.



Gambar 2.16 Hubungan pengaruh tipe injeksi terhadap NOx dan Particulate [4]

2. Sudarmanta, et al

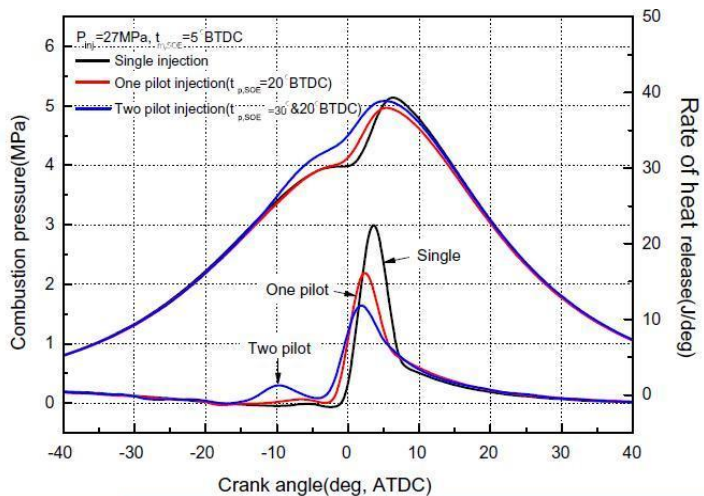
Sebuah studi numerik yang dilakukan oleh Sudarmanta, et al membandingkan sistem injeksi tunggal dan dua tingkat pada semprotan bebas dan pada ruang bakar mesin diesel Caterpillar 3406 serta pengaruhnya pada emisi gas NO menggunakan software Fluent 6.3.26. Menunjukkan bahwa laju kenaikan temperatur yang rendah pada injeksi 2 tingkat 25-75 pada simulasi numerik pembakaran di ruang bakar Caterpillar 3406 menyebabkan laju kenaikan fraksi massa, emisi NO-nya menurun 32,2 % dibandingkan dengan injeksi *single state*.



Gambar 2.17 Produksi NO terhadap derajat engkol dan tipe injeksi [2]

3. Suh, Hyun Kyu

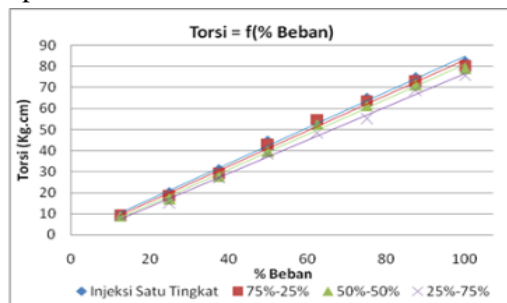
Studi eksperimental oleh Suh Hyun Kyu, pada studi eksperimental menggunakan mesin diesel dengan rasio kompresi rendah menggunakan sistem injeksi bertingkat didapatkan bahwa penggunaan injeksi bertingkat mampu mengurangi produksi emisi terutama emisi NO_x secara efektif, namun daya yang dihasilkan juga menurun. Injeksi bertingkat ditujukan agar tekanan dan temperatur puncak pembakaran tidak terlalu tinggi sehingga NO_x berkurang.

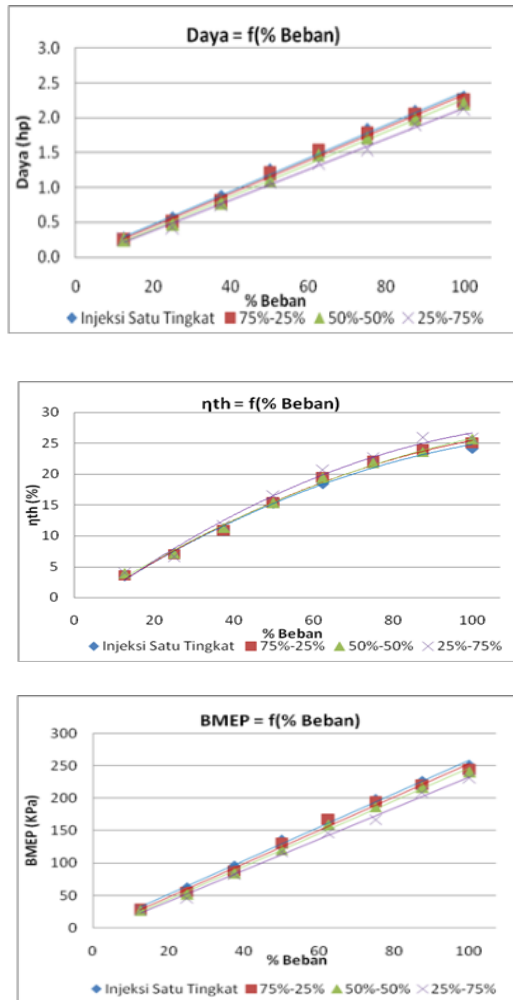


Gambar 2.18 *Effect of injection strategies on the combustion characteristics in low compression ratio engine [3]*

4. Hardiyanto, Arief

Menurut penelitian Arief Hardiyanto tentang hubungan mesin diesel dengan sistem injeksi bertingkat dengan variasi semprotan 75%-25%, 50%-50%, dan 25%-75%, diperoleh hasil terbaik pada semprotan 75%-25%. Hasil itu ditandai dengan seiring bertambahnya daya efektif, torsi, bmep dan nilai efisiensi thermis.





Gambar 2.19 Grafik Unjuk Kerja Penelitian Arief Hardiyanto.[16]

BAB III METODOLOGI

Dalam pendahuluan telah disebutkan bahwa tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui unjuk kerja sistem injeksi satu tingkat dibandingkan dengan injeksi bertingkat pada mesin diesel 1 silinder. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran Bahan Bakar Jurusan Teknik Mesin ITS. Metode yang akan digunakan dalam pengujian adalah dengan menggunakan pengujian kecepatan konstan (*constant speed test*). Pengujian dilakukan dengan menaikkan putaran mesin hingga mesin mencapai putaran optimum kemudian generator dinyalakan dan diberikan pembebanan lampu. Kemudian diukur tegangan dan arus output dari generator kemudian mengukur waktu konsumsi 25 ml bahan bakar dan mengukur temperatur gas buang, temperatur *engine*, temperatur oli pelumas, dan temperatur radiator.

III.1 Proses Pembuatan Dan Alat Yang Digunakan Saat Pembuatan Biodiesel.

Bahan-bahan dan peralatan yang diperlukan untuk membuat biodiesel dari minyak jelantah diperlukan bahan-bahan lain seperti methanol 99 % dan soda api (NaOH) dengan peralatan ember plastik, gelasukur, panci, kompor, sarung tangan karet, timbangan, pompa udara akuarium, kain katun tipis untuk penyaring, dan selang. Untuk perbandingan pembuatan biodiesel minyak jelantah (NaOH) 1 % dari minyak jelantah dan *metanol* 45 % dari minyak jelantah.

a) Variabel Tetap:

- Temperatur = $60^{\circ} - 70^{\circ}\text{C}$
- Lama Transesterifikasi = 60 menit
- Jumlah Soda Api (NaOH) = 10 gram
- Jumlah *Metanol* = 450 ml

Minyak jelantah yang digunakan dalam percobaan 1 liter.

b) Prosedur Percobaan

Berikut ini akan dijelaskan rincian dari diagram alir percobaan pada gambar 2.11 dalam pembuatan biodiesel ini:

Alat-alat yang digunakan:

- *Hot plate* (pemanas listrik) atau kompor, termometer untuk mengontrol suhu, *mixer* atau *stirrer* peralatan ember plastik, gelas ukur, panci, sarung tangan karet, timbangan, kain katun tipis untuk penyaring, dan selang.

➤ Reaksi Transesterifikasi

1. Memanaskan minyak di hotplate atau kompor hingga temperaturnya mencapai kurang lebih 60°C - 70°C sambil dilakukan pengadukan agar panasnya merata. Pengadukan dilakukan dengan kecepatan sedang dan jangan sampai terbentuk pusaran. Menambahkan bahan pelarut (*metoxida*) dibuat dengan mencampurkan 45% ml methanol dan 1 gram NaOH hingga larut selama 15 menit.



Gambar 3.1 Hasil Metoxide

2. Campurkan *metoxida* kedalam panci berisi 1 liter minyak jelantah, tuangkan *metoxida* perlahan-lahan sampai tercampur rata dan jaga suhu pada waktu pemasakan 60-70⁰ C dan aduk selama 60 menit dan temperatur dijaga agar tetap konstan.



Gambar 3.2 Proses pemasakan

3. Setelah selesai tuangkan kedalam ember dan diamkan 4-12 jam sampai terjadi pengendapan pada lapisan bawah terpisah dengan ester yang berada pada lapisan atas.
4. Pengendapan ditandai dengan dua lapisan berbeda warna dengan lapisan gelap berada di bawah yang disebut *crude gliserin*, sedangkan lapisan atas berwarna bening, *crude BD*.



Gambar 3.3 Hasil Proses Pemisahan Crude Gliserin, Sedangkan Lapisan Atas Berwarna Bening, Crude BD

➤ ***Tahap Pencucian***

Pisahkan *crude biodiesel* dari *crude gliserin* lalu masukkan ke ember untuk dicuci dengan cara mencampurkan *aquades* sebanyak 500 ml untuk melarutkan sisa-sisa garam dan sabun yang terbentuk serta masih tertinggal dalam ester.

➤ ***Pengeringan (penghilang kadar air)***

Setelah pencucian selesai kemudian dilakukan proses pengeringan untuk menghilangkan sisa air yang masih terkandung didalam metil ester selama proses pencucian berlangsung. Kandungan air yang tersisa dihilangkan dengan cara dipanaskan hingga temperatur 100°C agar air yang masih terkandung didalam metil ester tersebut dapat menguap sambil dilakukan pengadukan.



Gambar 3.4 Hasil Produksi Biodiesel

➤ ***Pengujian Karakteristik***

Setelah produk metilester yang dihasilkan tersebut menjalani serangkaian proses pencucian dan pengeringan (penghilang kadar air), maka metil ester tersebut pada dasarnya telah siap untuk digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel (biodiesel). Namun sebelum digunakan sebagai bahan bakar terlebih dahulu dilakukan pengujian karakteristik dengan tujuan

mengetahui apakah biodiesel tersebut benar-benar dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel serta mengetahui bahwa bahan bakar tersebut dapat digunakan tanpa menimbulkan masalah pada mesin diesel.

Untuk itu hasil pengujian karakteristik yang akan diperoleh nantinya sangat diharapkan dapat mendekati karakteristik dari petrodiesel yaitu berupa solar ataupun minyak diesel lainnya. Adapun beberapa karakteristik yang dianggap penting dan akan dilakukan pengujian yaitu viskositas (kekentalan), massa jenis, *flash point*, nilai kalor.

Tabel 3.1 Karakteristik yang telah di uji pada biodiesel :

No	Karakteristik	Satuan	Nilai	Standar SNI
1	Massa jenis pada 40 ⁰	Kg/m ³	860	850-890
2	Viskositas kinematic pada 40 ⁰	Mm ² /s	3,8	2,3-6,0
3	Flash Point	⁰ C	145	Min. 100
4	Nilai Kalor Bawah (NKB)	Mj/Kg	39540	-
5	Angka Setana	-	64	Min. 50

III.2. Alat Uji

Alat uji yang akan digunakan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut:



Gambar 3.5 Mesin Diesel DI 800

1. Mesin diesel 4 (empat) langkah dengan spesifikasi :

- Merek : Diesel Diamond
- Type : DI 800
- Model : 1 Silinder Diesel 4 Langkah
- Bore dan Stroke : 82 mm x 78 mm
- Displacement : 411 cc
- Max Power : 8 Hp (6 KW) / 2400 rpm
- Continous Power : 7 HP (5,22 KW) / 2200 rpm
- Compression Ratio : 18 : 1
- Cooling System : *Hopper / Condensor*
- Lube Capacity : 1,8 liter

2. Data Generator



Gambar 3.6 Generator Daiho

- Type : ST-6
- Volt – Ampere : 230 V – 26,1 A (AC)
- Max AC Output : 6 KW
- Frequency : 50 Hz
- Loading System : Electric Bulb System
- Electric Control : Volt, Amperemeter, Switch

3. Solenoid Injektor

Solenoid injektor yang akan digunakan dalam penelitian ini merupakan produk yang ada dan dijual dipasaran yang sesuai dengan kriteria yang diinginkan yaitu mampu menginjeksi biodiesel dalam beberapa tingkat dalam 1 siklus dan dapat dikontrol secara elektrik laju injeksinya.

- Merk : Denso
- Type : Selenoid Common Rail Injector 1 KD
- Impedance : High Impedance Injector



Gambar 3.7 Injektor standar Toyota Kijang Innova D4D

4. *Electronic Control Unit (ECU)*

ECU berfungsi sebagai penerima masukan data dari sensor sistem injeksi bertingkat dan mengontrol *start of injection* dan durasi injeksi bahan bakar biodiesel. ECU yang digunakan pada penelitian ini adalah *ECU Programmable* menggunakan *time delay calculator* 8051 pada komputer untuk mengatur durasi injeksi bahan bakar biodiesel.



Gambar 3.8 ECU DECS

- Merk : DECS
- Type : *Programmable* ECU

5. Sensor Crank Position



Gambar 3.9 sensor crank

- Merk : Suzuki
- Range : 0-12000 rpm

6. ACCU



Gambar 3.10 ACCU Yuasa

- Merk : Yuasa
- Tipe : NS-60
- Kapasitas : 12V – 45Ah

7. ACCU Charger



Gambar 3.11 ACCU Charger

- Merk : Krisbow
- Tipe : KW19-652
- Kapasitas : 12V-24V, 5A-20A

8. Thermocouple



Gambar 3.12 Thermocouple Type-K

- Tipe : Type-K
- Range : -190°C s/d 1260°

III.3. Alat Ukur

Alat ukur berfungsi untuk mengetahui nilai pada parameter-parameter yang akan dicari nilainya melalui pengukuran tersebut. Adapun alat ukur yang digunakan selama pengujian ini terdiri dari:

1. Gelas Ukur



Gambar 3.13 Gelas Ukur yang Digunakan Dalam pengujian

Alat ini digunakan untuk mengukur jumlah bahan bakar biodiesel yang dikonsumsi oleh mesin diesel. Gelas ukur ini memiliki spesifikasi sebagai berikut :

- Kapasitas : 25 ml

2. Stopwatch



Gambar 3.14 Stopwatch

Alat ini digunakan untuk mengukur waktu yang dibutuhkan mesin diesel untuk mengkonsumsi bahan bakar biodiesel sebanyak 25 ml.

3. Amperemeter

Alat ini digunakan untuk mengukur arus listrik (I) yang terjadi akibat pemberian beban pada generator listrik.



Gambar 3.15 Amperemeter

4. Voltmeter

Alat ini digunakan untuk mengukur tegangan listrik (V) yang dibangkitkan oleh generator listrik dan tang disuplai ke beban.

5. Digital Termocouple

Alat ini digunakan untuk mengetahui besarnya temperature dengan cara menghubungkan sensor temperatur ke saklar digital termocouple.



Gambar 3.16 Termocouple Digital

6. Digital Tachometer

Alat ini digunakan untuk mengukur putaran mesin



Gambar 3.17 Tachometer infrared digital

7. Beban Lampu

Beban lampu yang di gunakan terdiri atas lampu pijar sebanyak 8 buah dengan konsumsi daya masing-masing lampu sebesar 500 watt. Lampu-lampu tersebut disusun secara paralel dengan masing-masing lampu dilengkapi dengan tombol stop kontak untuk pengaturan beban.



Gambar 3.18 Beban lampu

III.4. Prosedur Pengujian

Dalam pengujian nantinya, beban maksimum yang diambil 4000 Watt dengan pertimbangan daya mesin serta transmisi mekanis antara mesin diesel dan generator listrik. Tahapan-tahapan pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

III.4.1. Tahapan Pengujian

Dalam proses pelaksanaan eksperimen ini ada beberapa tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Persiapan Pengujian

Hal-hal yang diperlukan dalam persiapan pengujian ini adalah sebagai berikut:

- a. Memeriksa kondisi kesiapan mesin yang meliputi kondisi fisik mesin, pelumas, sistem pendinginan, sistem bahan bakar dan kesiapan generator listrik.
- b. Memeriksa kondisi sistem pembebanan, sistem kelistrikan dan sambungan-sambungan listrik yang ada.
- c. Memeriksa kesiapan alat-alat ukur.
- d. Mempersiapkan alat tulis dan table untuk pengambilan data.

2. Pengujian Standart dengan Bahan Bakar Minyak Solar dan Biodiesel

Percobaan dilakukan dengan putaran mesin tetap (*stationary speed*) pada 2000 rpm dengan variasi beban listrik mulai dari 500 – 4000 Watt (0,5-4). Tahapannya adalah sebagai berikut:

- a. Menghidupkan mesin diesel,
- b. Melakukan pemanasan mesin diesel ± 10 menit pada putaran mesin 2000 rpm hingga temperature mesin mencapai temperatur operasi.
- c. Mengatur pembebanan pada mesin diesel mulai 500 Watt sampai dengan 4000 Watt (0,5-4) dengan interval kenaikan setiap 500 Watt dengan tetap menjaga putaran mesin sebesar 2000 rpm setiap pembebanan.
- d. Mencatat data-data yang dibutuhkan setiap kenaikan beban, seperti: waktu konsumsi solar

setiap 25 ml, temperature oli pelumas, air pendingin, mesin dan gas buang, tegangan listrik (V) dan arus listrik (I).

- e. Setelah pengambilan data selesai dilakukan, maka beban diturunkan secara bertahap hingga beban nol.
- f. Mesin dibiarkan dalam kondisi tanpa beban selama lebih kurang 5 menit.
- g. Mesin dimatikan dan ditunggu kembali dingin.

3. Pengujian dengan Bahan Bakar Biodiesel Minyak Jelantah Dengan Variasi Start of Injection dan Durasi Injeksi

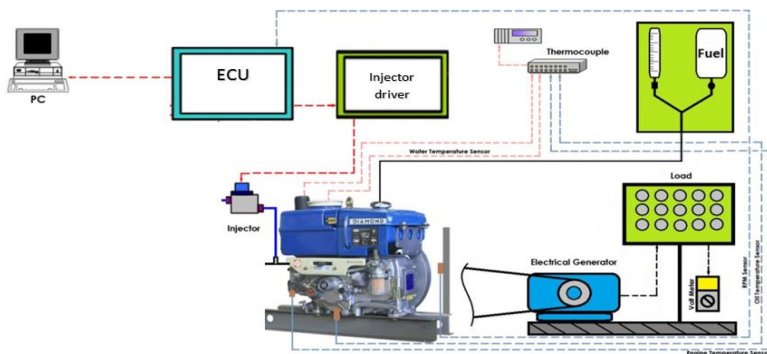
Untuk pengujian dengan menggunakan bahan bakar biodiesel, putaran mesin juga tetap (*stationary speed*) pada 2000 rpm dan dengan variasi beban listrik mulai dari 500 Watt sampai 4000 Watt (0,5 – 4). Pada pengujian injeksi bertingkat perlu dilakukan settingan suplai bahan bakar biodiesel terlebih dahulu. Adapun langkah pengujiannya sebagai berikut:

- a. Memastikan kembali kondisi kesiapan mesin diesel, pembebanan, kelistrikan, dan system penyuplai bahan bakar biodiesel.
- b. Menghidupkan mesin diesel dengan menggunakan biodiesel sebagai bahan bakar, tanpa memberikan beban dan membiarkannya hingga ± 20 menit.
- c. Pengaturan *pick up* berguna untuk mendapatkan derajat sudut awal injeksi bahan bakar biodiesel yang tepat pada setiap pembebanan mesin. Adapun besarnya variasi *start of injection* yang digunakan pada penelitian ini sebesar 10° , 12° , 14° dan 16° *before top dead center* (BTDC).
- d. Pengaturan durasi injeksi dengan menggunakan *time delay calculator* 8051 berguna untuk mengatur durasi injeksi bahan bakar biodiesel yang tepat pada setiap pembebanan mesin. Adapun variasi durasi injeksi yang digunakan pada penelitian ini adalah 13, 15, 17, dan 19 *milisecond* (ms).
- e. Mengatur pembebanan pada mesin diesel mulai 500 Watt sampai dengan 4000 Watt

- (0,5 – 4) dengan interval kenaikan setiap 500 Watt dengan tetap menjaga putaran mesin sebesar 2000 rpm setiap pembebanan.
- Mencatat data-data yang dibutuhkan setiap kenaikan beban, seperti waktu konsumsi biodiesel setiap 25 ml, temperatur (mesin, pelumas, air pendingin, gas buang), tegangan listrik (V) dan arus listrik (I).
 - Setelah pengambilan data selesai dilakukan, kemudian beban listrik diturunkan secara bertahap sampai nol dan menonaktifkan sistem injeksi bahan bakar biodiesel.
 - Mesin dibiarkan dalam kondisi tanpa beban selama ± 5 menit.
 - Mengulangi langkah a sampai h dengan variasi *start of injection* dan durasi injeksi bahan bakar biodiesel.

III.5. Skema Pengujian

Dalam melakukan penelitian eksperimen perlu dilakukan pembuatan skema rancangan penelitian agar didapatkan urutan pengujian dengan tepat. Adapun skema penelitian dalam melakukan pengujian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.19 Skema Pengujian

III.6. Rancangan Eksperimen

Dalam perancangan eksperimen ada beberapa parameter yang ingin didapatkan dengan memetakan parameter *input* dan *output*. Tabel rancangan eksperimen dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.2 berikut :

Tabel 3.2 Parameter-Parameter Eksperimen

Parameter Input		Parameter Output	
Konstan	Variasi	Diukur	Dihitung
<ul style="list-style-type: none"> • Bahan Bakar : Biodiesel Minyak Jelantah • Spesifikasi <i>engine</i> standar dengan injeksi bertingkat (75%-25%) • Kondisi putaran mesin 2000 rpm 	<ul style="list-style-type: none"> • Pembebanan lampu mulai 500 watt hingga 4000 watt dengan interval 500 watt. • <i>Start of Injection</i> : 10°, 12°, 14°, dan 16° BTDC • Durasi Injeksi : 13, 15, 17, 19 <i>milisecond</i> (ms) 	<ul style="list-style-type: none"> • V dan I • Waktu konsumsi 25 ml bahan bakar • Suhu Mesin, Pelumas, Exhaust dan Pendingin • Emisi gas buang 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne • BMEP • Sfc • Effisiensi thermal • Torsi

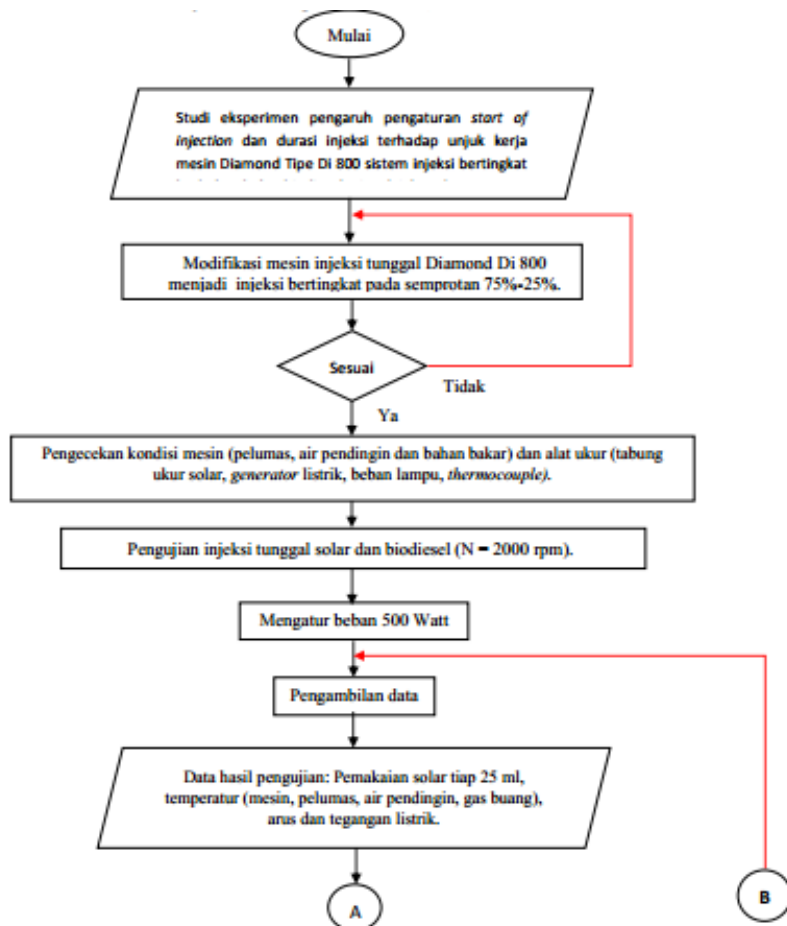
Dari eksperimen ini, data-data yang didapatkan dihitung dan kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik fungsi beban listrik terhadap:

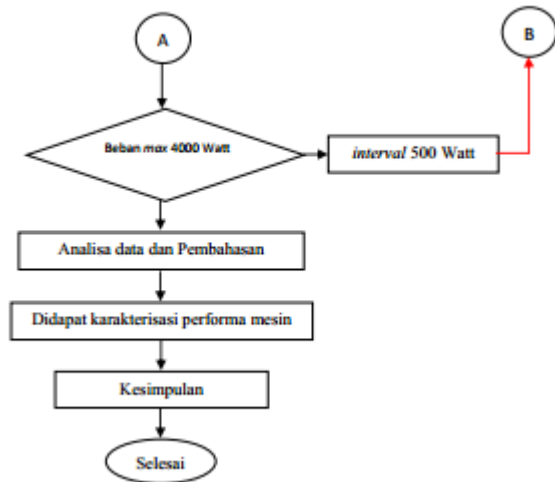
- Daya = f (beban)
- Torsi = f (beban)
- bmep = f (beban)
- Sfc = f (beban)
- η_{th} = f (beban)
- $T_{gas\ buang}$ = f (beban)
- $T_{oli\ pelumas}$ = f (beban)
- $T_{air\ pendingin}$ = f (beban)
- T_{mesin} = f (beban)
- NOx = f (durasi injeksi)

III. 7. Flowchart Penelitian

Dalam melakukan penelitian eksperimen perlu dilakukan pembuatan *flowchart* penelitian yang berfungsi untuk menjelaskan secara singkat alur atau proses penelitian eksperimen yang dilakukan. Adapun *flowchart* pada penelitian ditunjukkan pada gambar 3.20 dan 3.21.

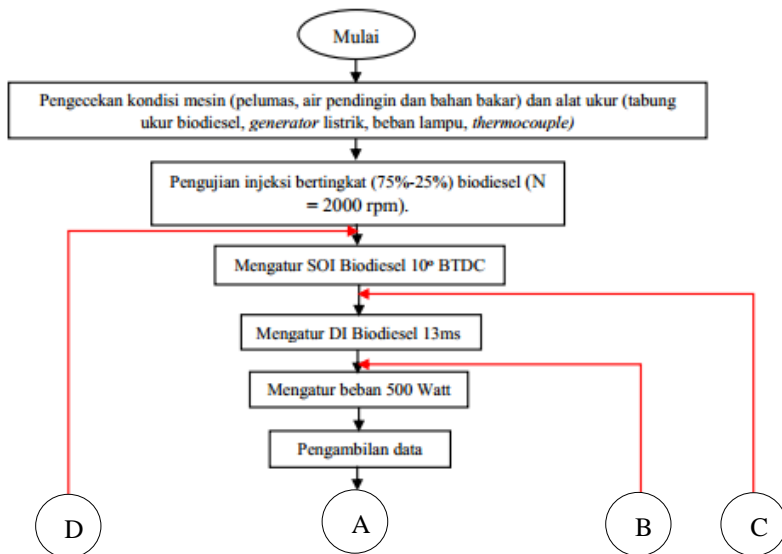
III.7.1 Flowchart Injeksi Bertingkat (Standar)

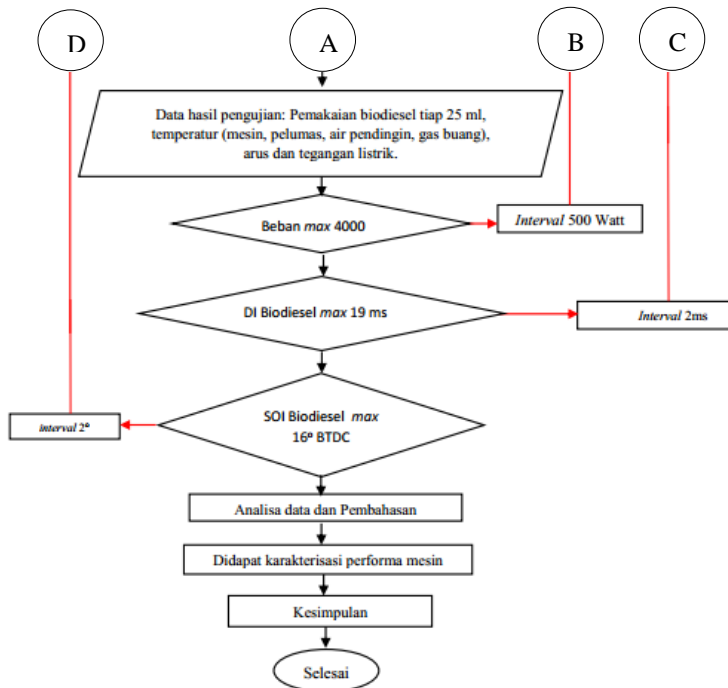




Gambar 3.20 Flowchart penelitian injeksi bertingkat standar.

III.7.2 Flowchart Injeksi Bertingkat (Variasi)





Gambar 3.21 Flowchart penelitian injeksi bertingkat dengan variasi SOI dan durasi injeksi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengambilan Data.

Pada eksperimen ini didapatkan data-data yang harus diolah lebih lanjut untuk mendapatkan karakteristik performa mesin *diesel* Diamond Di 800 *generator set* sistem injeksi bertingkat. Untuk itu perlu didapatkan parameter-parameter dengan cara diukur dan dihitung. Parameter yang diukur adalah putaran mesin, temperatur (mesin, gas buang, pelumas dan cairan pendingin), besaran arus dan tegangan. Sedangkan untuk parameter yang dihitung meliputi daya mesin (daya efektif), torsi, *brake mean effective pressure* (BMEP), *specific fuel consumption* (SFC), efisiensi thermal. Agar didapatkan data pembandingan dalam penelitian ini yang lebih tepat, maka dilakukan pengujian awal saat mesin dioperasikan dengan injeksi bertingkat semprotan 75%-25% tanpa variasi. Beban listrik tertinggi yang dapat dicapai oleh *generator set* adalah 4000 Watt.

4.2 Perhitungan Durasi Injeksi Bahan Bakar Biodiesel

Durasi injeksi biodiesel merupakan lamanya injektor menginjeksikan bahan bakar biodiesel ke ruang bakar melalui *intake manifold*. Bahasa pemrograman yang diterima ECU untuk durasi injeksi adalah dalam bentuk besaran waktu *millisecond* (ms). Untuk mengkonversi durasi injeksi dari besaran derajat *crank angle* (°CA) pada putaran mesin konstan 2000 rpm ke dalam satuan waktu dapat dilakukan perhitungan, sebagai berikut:

$$2000 \text{ rpm} = \frac{2000 \text{ revolution}}{1 \text{ menit}} \times \frac{360^\circ \text{ CA}}{1 \text{ revolution}} \times \frac{1 \text{ menit}}{60000 \text{ milisecond}} = 12 \frac{^\circ \text{CA}}{\text{ms}}$$

dimana: $360^\circ \text{CA} = 1 \text{ revolution } ^\circ \text{CA}$ untuk motor 4-langkah
maka durasi injeksi selama 19 ms adalah

$$12 \frac{^\circ \text{CA}}{\text{ms}} \times 19 \text{ ms} = 228^\circ \text{CA}$$

sehingga pada pengaturan durasi injeksi 19 ms didapatkan penginjeksian biodiesel dilakukan selama 228 °CA.

4.3 Perhitungan Unjuk Kerja

Tujuan melakukan perhitungan unjuk kerja adalah untuk mengetahui unjuk kerja dari mesin *diesel* Diamond Di 800 *generator set* berbahan bakar biodiesel dengan sistem injeksi bertingkat. Contoh perhitungan unjuk kerja diambil pada data penelitian saat mesin injeksi bertingkat pada *start of injection* (SOI) 10° *before top dead center* (BTDC) serta durasi injeksi (DI) 114° CA / 19 *milisecond* (ms) dengan settingan pada injeksi bertingkat 75%-25%. Data yang digunakan pada contoh perhitungan ini merupakan data yang diambil saat kondisi beban penuh 3000 Watt (75%).

4.3.1.1 Menghitung Laju Aliran Massa Bahan Bakar Biodiesel ($\dot{m}_{biodiesel}$).

Untuk menghitung laju alir massa bahan bakar biodiesel (*biodiesel mass flowrate*) digunakan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{m}_{biodiesel} = \frac{m_{biodiesel}}{t_{biodiesel}} \frac{kg}{s}$$

dimana massa biodiesel didapat dari:

$$m_{biodiesel} = \rho_{biodiesel} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot V_{biodiesel} (m^3)$$

$$m_{biodiesel} = 860 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times 0,000025 (m^3)$$

$$m_{biodiesel} = 0.0215 \text{ kg}$$

maka laju alir massa biodiesel :

$$\dot{m}_{biodiesel} = \frac{0.0215}{172} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{biodiesel} = 0.000125 \text{ kg/s}$$

4.3.1 Daya Efektif (N_e)

Daya mesin merupakan daya yang diberikan mesin untuk mengatasi beban yang diberikan. Daya yang dihasilkan pada mesin *diesel* yang dikopel dengan *generator* listrik dapat dihitung berdasarkan beban pada *generator* listrik dan dinyatakan sebagai daya efektif pada *generator* (N_e). Hubungan tersebut dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$N_e (W) = \frac{V \cdot I \cdot \cos \phi}{\eta_{gen} \cdot \eta_{transmisi}}$$

- a. Daya untuk percobaan injeksi bertingkat semprotan 75%-25% dengan beban 3000 watt, dengan data sebagai berikut:

$$N_e = \frac{220 \cdot 13.8 \cdot 1}{0.9 \cdot 0.95}$$

$$N_e = 3550.88 \text{ W}$$

- b. Daya untuk percobaan injeksi bertingkat settingan semprotan 75%-25% dengan DI 19 ms, SOI 10, beban 3000 watt, dengan data sebagai berikut :

$$N_e = \frac{220 \cdot 13.9 \cdot 1}{0.9 \cdot 0.95}$$

$$N_e = 3602.34 \text{ W}$$

4.3.2 Torsi

Torsi merupakan gaya yang bekerja pada poros engkol (*crankshaft*). Torsi pada penelitian ini dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Mt (Nm) = \frac{N_e (\text{watt})}{n (\text{rev/min})} \times \frac{1 \cancel{J}}{1 \cancel{W} \cdot \cancel{s}} \times \frac{60 \cancel{s}}{1 \cancel{min}} \times \frac{1 \cancel{rev}}{2\pi} \times \frac{1 Nm}{1 \cancel{J}}$$

- a. Torsi untuk percobaan injeksi bertingkat semprotan 75%-25% tanpa variasi dengan beban 3000 watt, dengan data sebagai berikut :

$$Mt (Nm) = \frac{3550.88 (\cancel{watt})}{2000 (\cancel{rev/min})} \times \frac{\cancel{1J}}{1 \cancel{W} \cdot s} \times \frac{60 s}{1 \cancel{min}} \times \frac{1 rev}{2\pi} \times \frac{1Nm}{\cancel{1J}}$$

$$Mt (Nm) = 53.26 Nm$$

- b. Torsi untuk percobaan injeksi bertingkat settingan semprotan 75%-25% DI 19, SOI 10, beban 3000 watt, dengan data sebagai berikut:

$$Mt (Nm) = \frac{3602.34 (\cancel{watt})}{2000 (\cancel{rev/min})} \times \frac{\cancel{1J}}{1 \cancel{W} \cdot s} \times \frac{60 s}{1 \cancel{min}} \times \frac{1 rev}{2\pi} \times \frac{1Nm}{\cancel{1J}}$$

$$Mt (Nm) = 54.03 Nm$$

4.3.3 Brake Mean Effective Pressure (BMEP)

Brake mean effective pressure atau tekanan efektif rata-rata teoritis bekerja sepanjang *volume* langkah *piston* sehingga menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya efektif.

$$bmep (kPa) = \frac{Ne (W) \cdot z \cdot 10^3}{V (dm^3) \cdot n (rev/sec) \cdot i}$$

- a. *Brake mean effective pressure* untuk percobaan injeksi bertingkat semprotan 75%-25% dengan pada beban 3000 watt, dengan data sebagai berikut:

$$bmep (kPa) = \frac{3.55 kW \cdot 2 rev \cdot 10^3}{0.4119193 dm^3 \cdot 33.33 rev/sec \cdot 1}$$

$$bmep = 517.27 kPa$$

- b. *Brake mean effective pressure* untuk percobaan injeksi bertingkat settingan semprotan 75%-25% DI 19, SOI 10, beban 3000 watt, dengan data sebagai berikut:

$$BMEP = \frac{3.60 kW \cdot 2 rev \cdot 10^3}{0.411919346 dm^3 \cdot 33.33 rev/sec}$$

$$BMEP = 524.76 kPa$$

4.3.4 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

- a. Konsumsi bahan bakar spesifik untuk percobaan injeksi bertingkat semprotan 75%-25% dengan pada beban 3000 watt, adalah sebagai berikut:

$$sfc \text{ (kg/kW} \cdot \text{h)} = \frac{\dot{m}_{bb} \text{ (kg/s)}}{N_e \text{ (kW)}}$$

$$sfc \text{ (kg/kW} \cdot \text{h)} = \frac{0.000291 \times 3600}{3.55 \text{ (kW)}}$$

$$sfc = 0.294 \text{ (kg/kW} \cdot \text{h)}$$

- b. Konsumsi bahan bakar spesifik untuk percobaan injeksi bertingkat settingan semprotan 75%-25% DI 19, SOI 10, beban 3000 watt, adalah sebagai berikut:

$$sfc \text{ (kg/kW} \cdot \text{h)} = \frac{0.000341 \times 3600}{3.60 \text{ (kW)}}$$

$$sfc = 0.341 \text{ (kg/kW} \cdot \text{h)}$$

4.3.5 Efisiensi Thermal

- a. Nilai efisiensi thermal untuk percobaan injeksi bertingkat semprotan 75%-25% dengan pada beban 3000 watt, adalah sebagai berikut:

$$\eta_{th} = \frac{N_e}{\dot{m}_{biodiesel} \cdot NKB} \times 100\%$$

$$\eta_{th} = \frac{3.55 \text{ kW}}{0.000291 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 39540 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 100\%$$

$$\eta_{th} = 30.94 \%$$

- b. Nilai efisiensi thermal untuk percobaan injeksi bertingkat settingan semprotan 75%-25% DI 19, SOI 10, beban 3000 watt, adalah sebagai berikut:

$$\eta_{th} = \frac{N_e}{\dot{m}_{biodiesel} \cdot NKB} \times 100\%$$

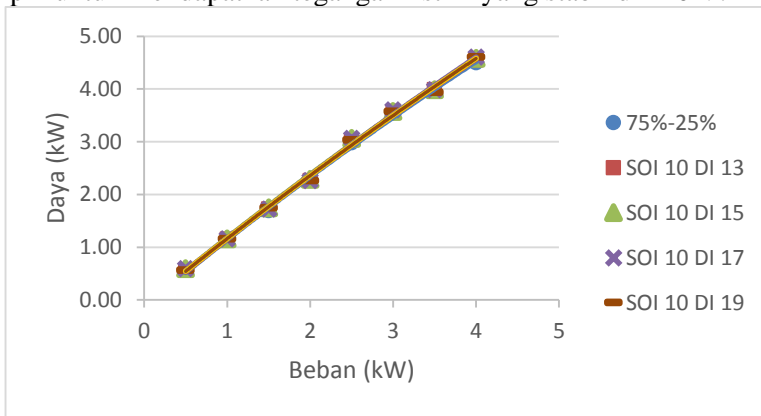
$$\eta_{th} = \frac{3.60 \text{ kW}}{0.000247 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 39540 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 100\%$$

$$\eta_{th} = 26.73 \%$$

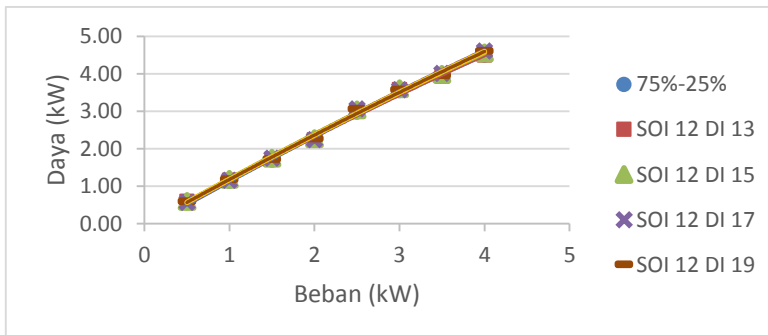
4.4 Analisa Unjuk Kerja.

4.4.1 Daya (Ne).

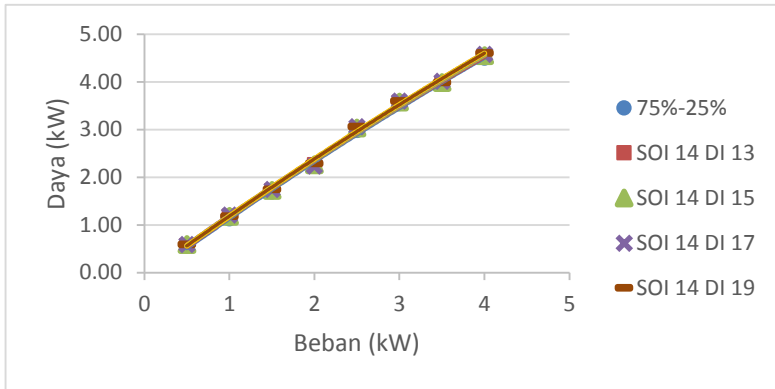
Unit *generator set* bekerja dengan menghasilkan tegangan listrik dimana putaran generator dijaga konstan pada putaran 2000 rpm untuk mendapatkan tegangan listrik yang stabil di 220 V.



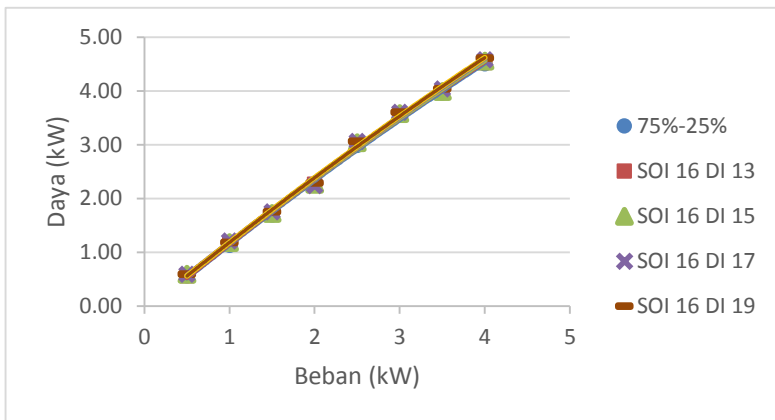
Gambar 4.1. a Grafik Daya Fungsi Beban dengan SOI 10° BTDC.



Gambar 4.1. b Grafik Daya Fungsi Beban dengan SOI 12° BTDC.



Gambar 4.1.c Grafik Daya Fungsi Beban dengan SOI 14⁰BTDC.



Gambar 4.1.d Grafik Daya Fungsi Beban dengan SOI 16⁰BTDC.

Unit *gen-set* bekerja dengan menghasilkan tegangan listrik dimana putaran generator harus dijaga konstan pada 2000 rpm untuk mendapatkan tegangan listrik tetap, sementara pada saat beban listrik ditambah maka akan menyebabkan putaran generator yang diputar oleh *engine* akan turun.. Setiap penambahan beban

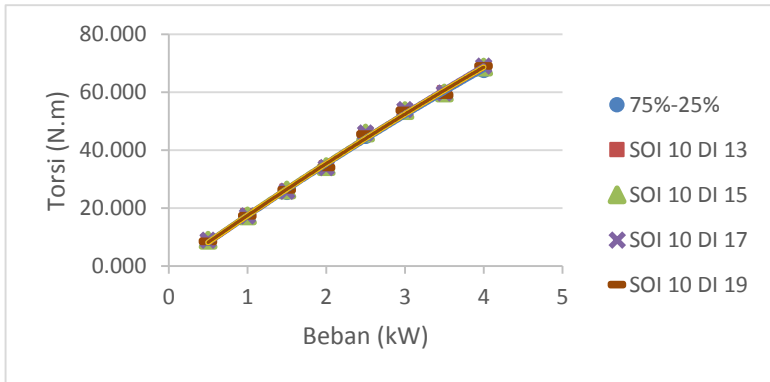
listrik maka jumlah biodiesel yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar akan lebih banyak untuk menjaga putaran *engine* konstan.

Sehingga analisa yang dapat dinyatakan dari grafik daya di atas, adalah daya yang diperlukan akan naik dengan bertambahnya beban listrik yang diberikan sebagai kompensasi bertambahnya bahan bakar yang masuk ke ruang bakar. Bahan bakar yang bertambah banyak menyebabkan semakin banyak energi yang dapat dikonversi menjadi energi panas dan mekanik dengan udara yang cukup. Energi menjadikan daya *engine* semakin besar sesuai dengan beban yang diberikan kepada *engine*.

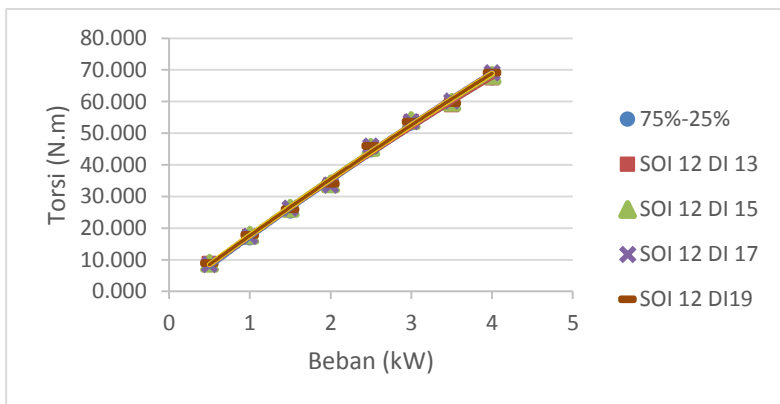
Idealnya untuk putaran mesin konstan, daya akan naik sebanding dengan bertambahnya beban. Untuk beban 12.5% hingga 100% mengikuti idealnya kenaikan daya yang linier dengan kenaikan beban. Kemudian perubahan besaran daya antara sistem injeksi bertingkat semprotan 75%-25% dengan dengan injeksi bertingkat menggunakan variasi SOI 10^0 (BTDC) dengan durasi injeksi pada 13, 15, 17, dan 19 ms relatif kecil, hal ini disebabkan oleh pengaturan suplai bahan bakar pada oleh mekanisme ECU untuk menjaga putaran mesin tetap konstan di putaran 2000 rpm agar voltase yang dihasilkan stabil.

4.4.2 Torsi (Mt).

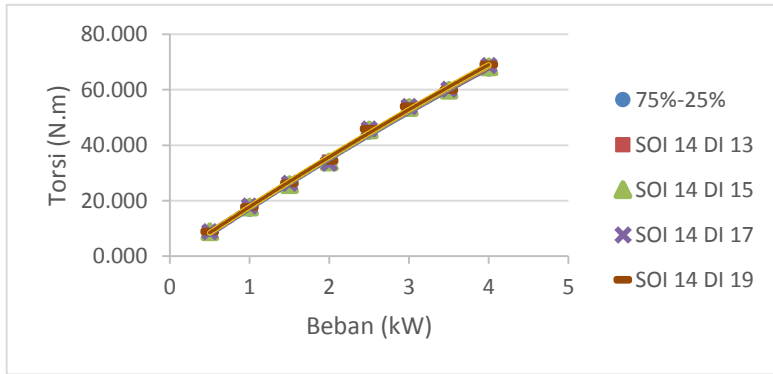
Torsi merupakan ukuran kemampuan dari mesin untuk menghasilkan kerja. Torsi dari mesin berguna untuk mengatasi hambatan sewaktu beban diberikan ke poros mesin. Sehingga dapat disimpulkan, bahwa torsi akan semakin besar apabila beban yang diberikan juga semakin besar. Di bawah ini adalah grafik torsi fungsi beban untuk percobaan injeksi bertingkat 75%-25% standart dan variasi pada durasi injeksi.



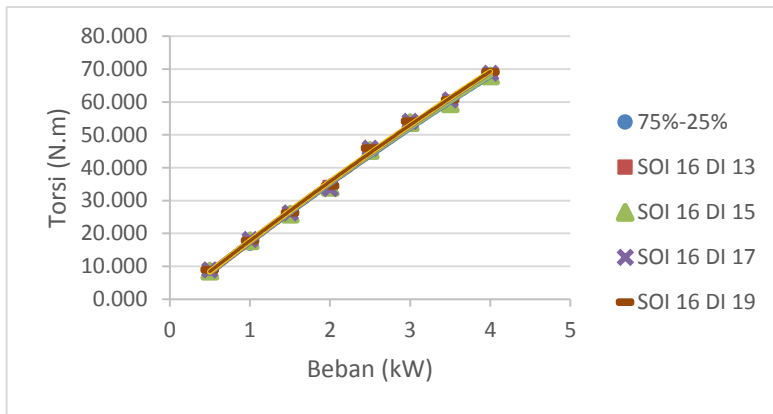
Gambar 4.2.a Grafik Torsi Fungsi Beban dengan SOI 10⁰BTDC.



Gambar 4.2.b Grafik Torsi Fungsi Beban dengan SOI 12⁰BTDC.



Gambar 4.2.c Grafik Torsi Fungsi Beban dengan SOI 14⁰ BTDC.



Gambar 4.2.d Grafik Torsi Fungsi Beban dengan SOI 16⁰BTDC.

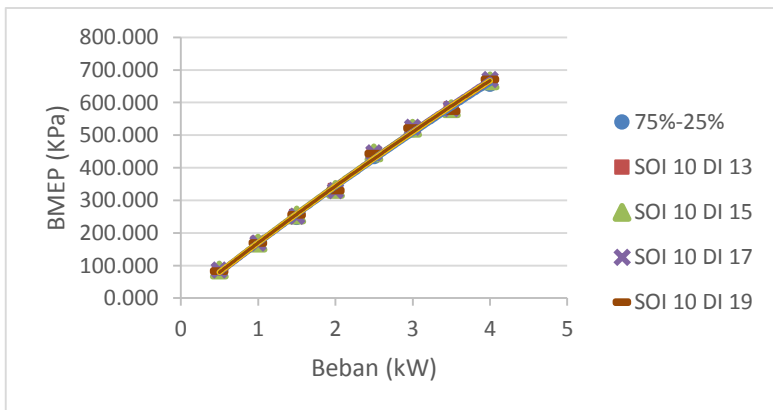
Grafik torsi mesin fungsi beban listrik ini memiliki karakteristik yang sama dengan grafik daya efektif. Torsi merupakan ukuran kemampuan dari mesin untuk menghasilkan kerja. Torsi dari mesin berguna untuk mengatasi hambatan sewaktu beban diberikan ke poros mesin. Sehingga dapat disimpulkan secara sederhana bahwa torsi akan semakin besar, apabila beban yang diberikan juga semakin besar. Karena dalam pengujian

penelitian ini putaran mesin dijaga konstan, maka perubahan nilai torsi bergantung variasi daya efektif yang pada akhirnya bentuk grafik yang ditunjukkan sama dengan bentuk grafik yang ditunjukkan oleh grafik daya efektif fungsi beban listrik.

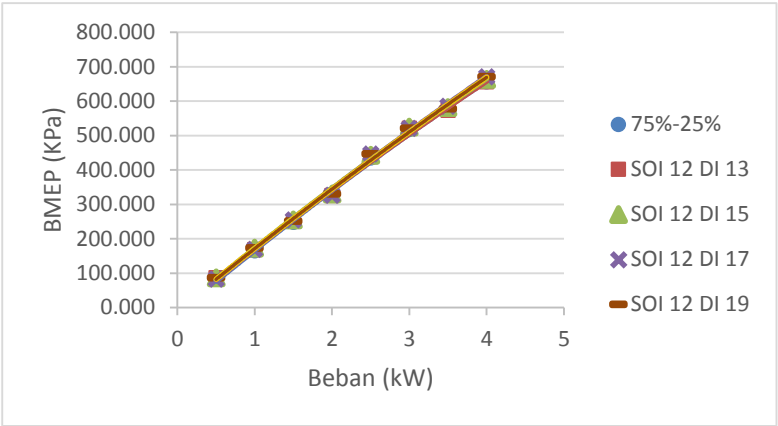
Perubahan torsi antara sistem injeksi bertingkat semprotan 75%-25% dengan dengan sistem injeksi bertingkat pada pengaturan SOI dan durasi injeksi relatif kecil, dikarenakan perubahan nilai arus dan tegangan yang dihasilkan oleh generator juga relatif kecil. Perubahan torsi akibat penambahan durasi dan start injeksi biodiesel yang masuk ke ruang bakar juga relatif kecil karena mekanisme memasukkan bahan bakar biodiesel yang dikontrol oleh ECU untuk menjaga putaran mesin tetap konstan.

4.4.3 *Brake Mean Effective Pressure (BMEP)*

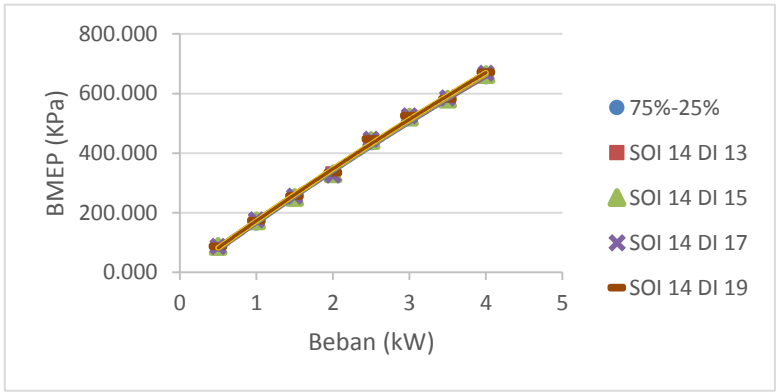
Brake mean effective pressure atau tekanan efektif rata-rata didefinisikan dengan tekanan tetap rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang langkah kerja piston. Besarnya tekanan yang dialami piston berubah-ubah sepanjang langkah piston tersebut. Jika diambil tekanan berharga konstan yang bekerja pada piston dan menghasilkan kerja yang sama, maka tekanan tersebut merupakan tekanan efektif rata-rata piston.



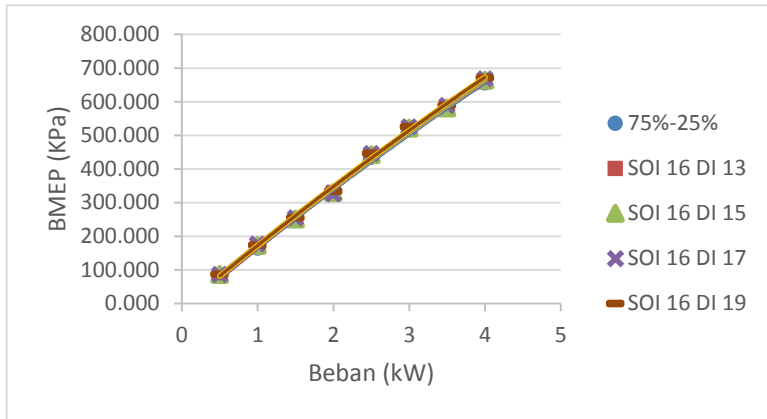
Gambar 4.3.a Grafik BMEP Fungsi Beban dengan SOI 10⁰BTDC.



Gambar 4.3.b Grafik BMEP Fungsi Beban dengan SOI 12⁰BTDC.



Gambar 4.3. c Grafik BMEP Fungsi Beban dengan SOI 14⁰ BTDC.



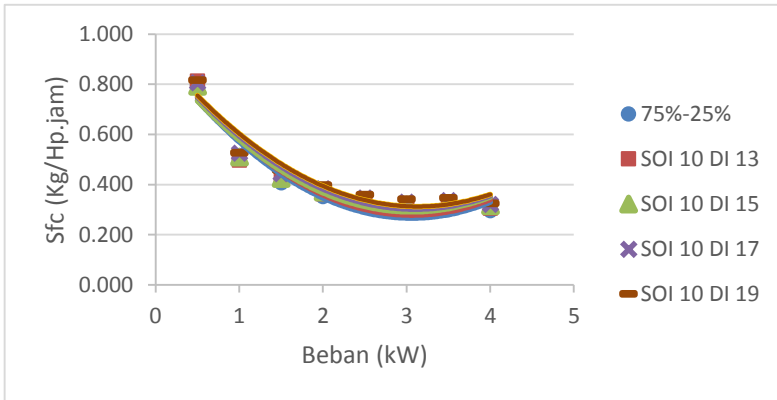
Gambar 4.3.d Grafik BMEP Fungsi Beban dengan SOI 16⁰BTDC.

Tekanan efektif rata-rata merupakan tekanan tetap teoritis yang bekerja sepanjang langkah volume piston sehingga menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya efektif. Dari gambar, terlihat bahwa besar bmeip naik seiring dengan penambahan beban, hal ini disebabkan injeksi bahan bakar kedalam ruang bakar yang semakin besar, sehingga pembakaran yang terjadi semakin besar, yang merupakan kompensasi untuk menjaga putaran engine konstan. Semakin banyak bahan bakar yang diledakkan di ruang bakar, maka tekanan ekspansi yang dihasilkan juga akan semakin besar. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya kenaikan BMEP seiring dengan kenaikan beban.

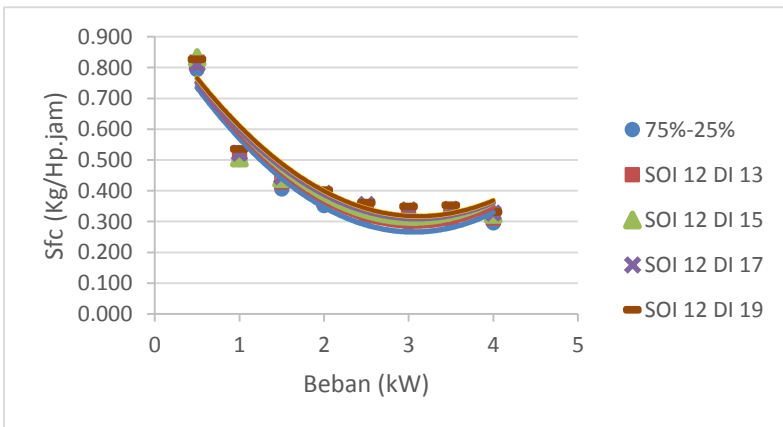
Apabila ditinjau dari grafik, maka bentuk grafik BMEP fungsi beban listrik di atas membentuk garis lurus linier mengikuti bentuk ideal dari grafik BMEP fungsi beban listrik, dengan mengabaikan bentuk perbedaan nilai bmeip yang cukup kecil antara masing-masing garis sesuai dengan variasi *start of injection* dan durasi injeksi biodiesel. Perubahan tekanan antara sistem injeksi bertingkat dengan atau tanpa variasi relatif kecil, hal ini akibat dari perubahan nilai arus dan tegangan yang dihasilkan oleh generator juga relatif kecil.

4.4.4 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (*sfc*)

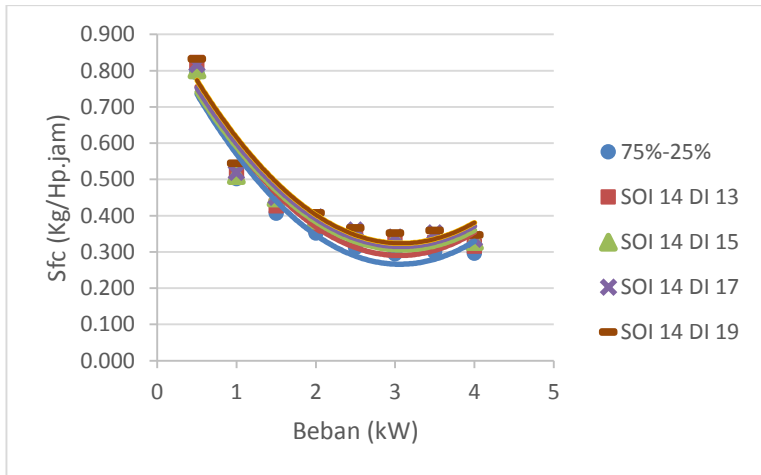
Specific Fuel Consumption (sfc) adalah jumlah massa bahan bakar yang dikonsumsi mesin untuk menghasilkan daya efektif 1 KW selama 1 jam.



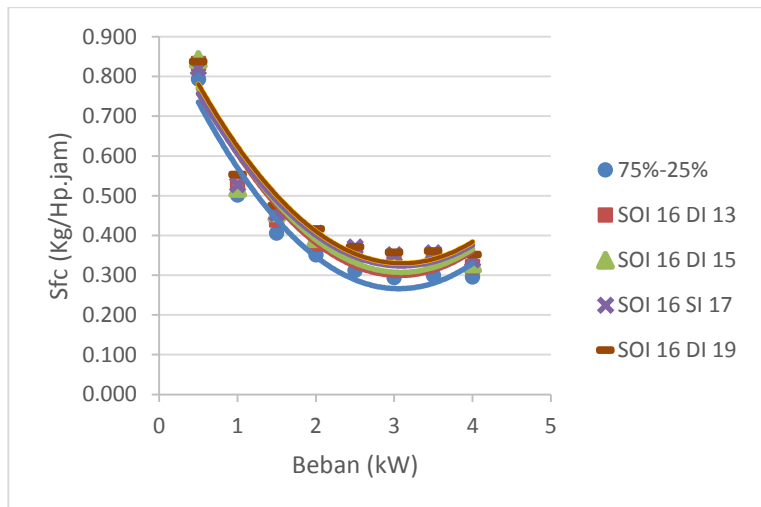
Gambar 4.4. a Grafik *Sfc* Fungsi Beban dengan SOI 10⁰ BTDC.



Gambar 4.4. b Grafik *Sfc* Fungsi Beban dengan SOI 12⁰ BTDC.



Gambar 4.4. c Grafik S_{fc} Fungsi Beban dengan SOI 14⁰ BTDC.

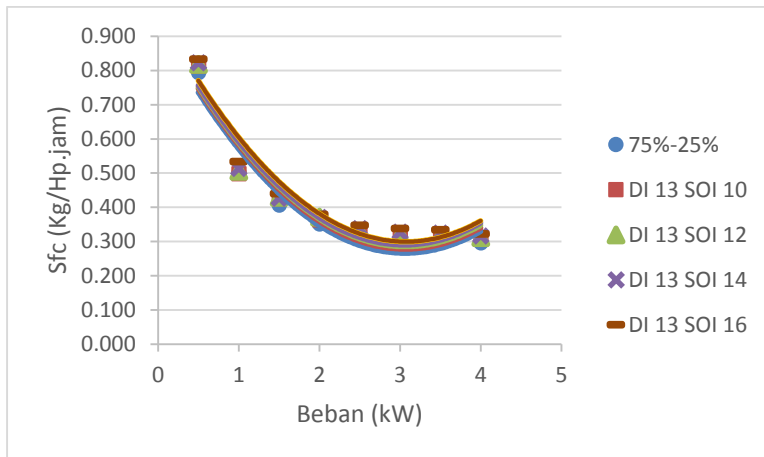


Gambar 4.4. d Grafik S_{fc} Fungsi Beban dengan SOI 16⁰ BTDC.

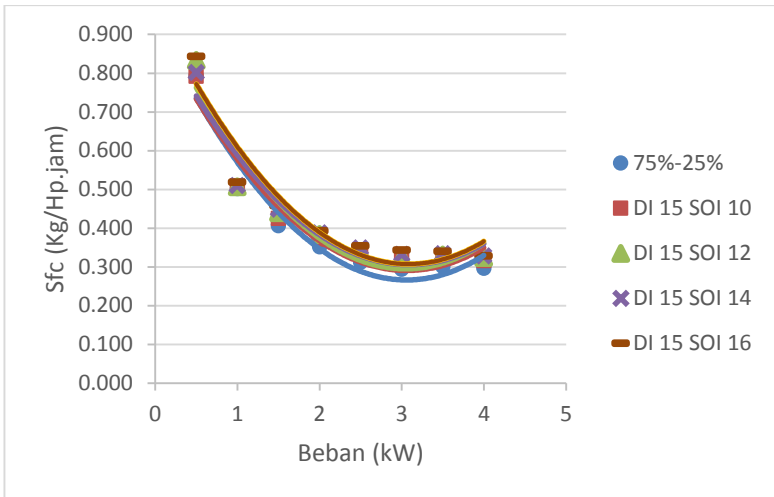
Gambar 4.4 di atas merupakan grafik S_{fc} total bahan bakar fungsi beban dengan fungsi beban dengan variasi durasi injeksi 13,

15, 17, dan 19 ms. Pada gambar di atas secara umum menunjukkan bahwa nilai SFC semakin turun seiring dengan penambahan beban yang semakin tinggi, hal ini karena semakin besar beban maka mesin akan semakin banyak memerlukan konsumsi bahan bakar pada putaran motor yang konstan. Setelah beban ditambah, grafik SFC cenderung mengalami penurunan sampai titik minimum di beban 3 kW, kemudian nilai SFC mengalami peningkatan.

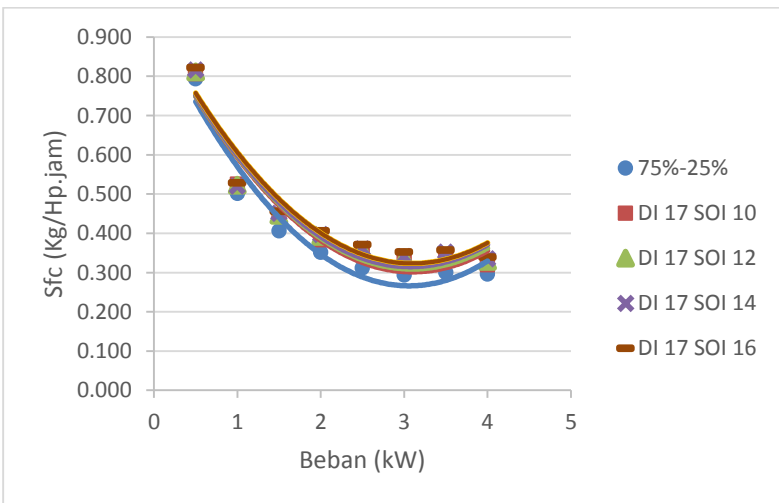
Dari empat grafik di atas dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan nilai sfc seiring dengan peningkatan durasi injeksi. Hal itu disebabkan karena, semakin tinggi nilai durasi biodiesel, massa bahan bakar biodiesel yang masuk ke ruang bakar lebih besar. Dengan memajukan titik *start of injection* maka akan memberikan cukup waktu untuk proses persiapan pembakaran biodiesel selama fase *delay periode* sehingga pembakaran yang dihasilkan lebih sempurna.



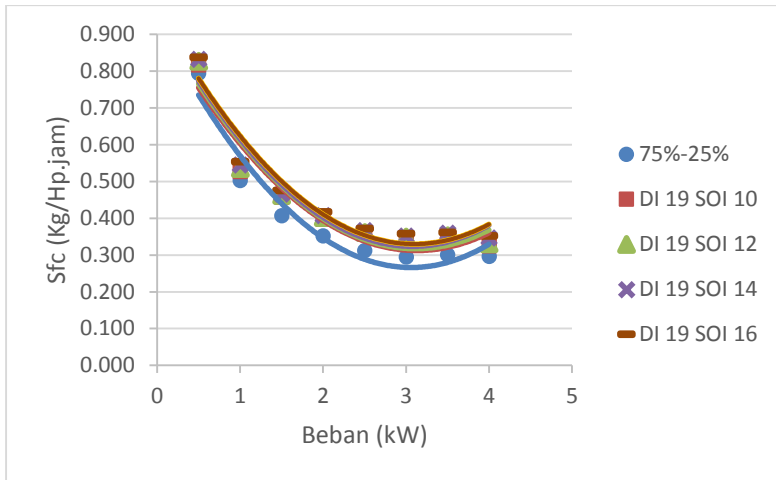
Gambar 4.4. e Grafik *Sfc* Fungsi Beban dengan DI 13 ms.



Gambar 4.4. f Grafik S_{fc} Fungsi Beban dengan DI 15 ms.



Gambar 4.4. g Grafik S_{fc} Fungsi Beban dengan DI 17 ms.



Gambar 4.4. h Grafik *Sfc* Fungsi Beban dengan DI 19 ms.

Gambar 4.4 di atas merupakan grafik *Sfc* total bahan bakar fungsi beban dengan fungsi beban dengan variasi *start of injection* 10, 12, 14, dan 16⁰ BTDC. Pada gambar di atas secara umum menunjukkan bahwa nilai *SFC* semakin turun seiring dengan penambahan beban yang semakin tinggi, hal ini karena semakin besar beban maka mesin akan semakin banyak memerlukan konsumsi bahan bakar pada putaran motor yang konstan. Setelah beban ditambah, grafik *SFC* cenderung mengalami penurunan sampai titik minimum di beban 3000 Watt (3 kW), kemudian nilai *SFC* mengalami peningkatan dikarenakan interval nilai daya dan laju alir massa (*mass flowrate*) yang didapat pada beban 3,5-4 kW lebih besar dibandingkan beban 0,5-3 kW.

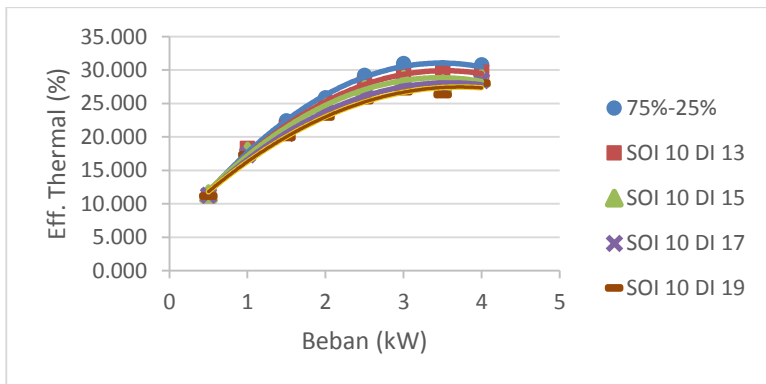
Dari empat grafik di atas dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan nilai *sfc* seiring dengan pengaturan *start of injection*. Hal itu disebabkan karena, dengan memundurkan titik *start of injection* maka akan memberikan cukup waktu untuk proses persiapan pembakaran biodiesel selama fase *delay periode* pada pengaturan durasi injeksi yang sama.

$$sfc \text{ (kg/kW} \cdot \text{h)} = \frac{3600 \cdot (\dot{m}_{biodiesel})}{Ne \text{ (kW)}}$$

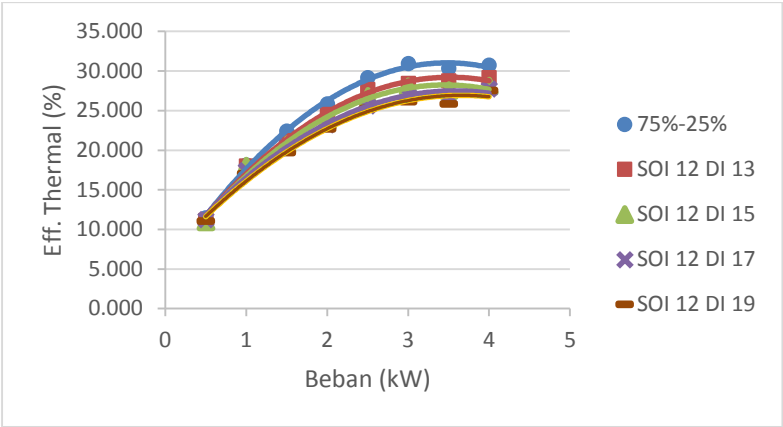
Rumus di atas adalah perumusan yang digunakan untuk mencari nilai sfc biodiesel. Berdasarkan perumusan di atas, laju alir massa biodiesel yang berbeda-beda untuk setiap pembebanannya dan setiap pengaturan *start of injection* dan durasi injeksi. Dimana nilai sfc yang semakin turun berbanding lurus dengan peningkatan nilai daya yang dihasilkan, karena semakin lama durasi injeksi yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar semakin besar pula energi yang dihasilkan.

Apabila diambil satu kondisi beban listrik pada saat pengoperasian, maka akan terlihat pengaruh lamanya durasi injeksi dan memajukan titik *start of injection* akan meningkatkan nilai SFC. Nilai SFC terendah terjadi saat penggunaan bahan bakar dengan pengoperasian pada variasi durasi injeksi 13 ms dan *start of injection* 10° BTDC yaitu meningkat sebesar 1,16 %, sedangkan nilai SFC tertinggi didapat saat pengoperasian dengan variasi durasi injeksi 19 ms dan *start of injection* 16° BTDC yaitu meningkat sebesar 5,84 %.

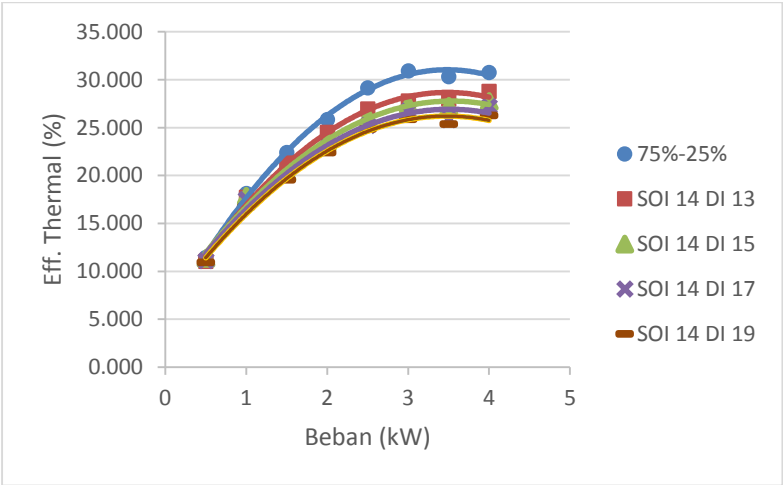
4.4.5 Efisiensi Thermal (η_{th}).



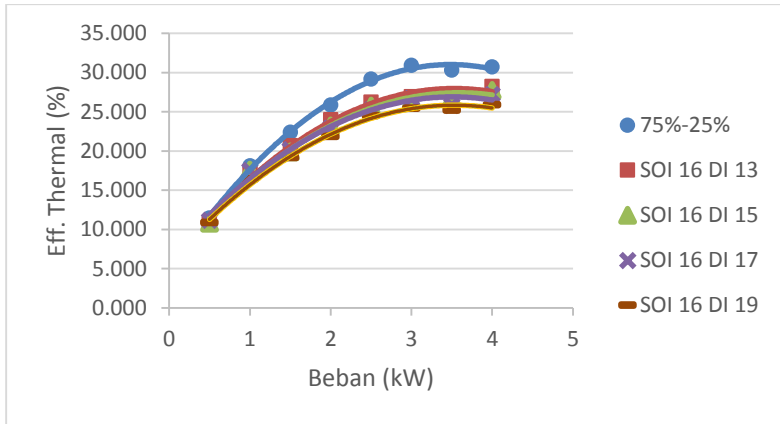
Gambar 4.5. a Grafik Nilai Efisiensi Thermal Fungsi Beban pada SOI 10° BTDC.



Gambar 4.5. b Grafik Nilai Effisiensi Thermal Fungsi Beban pada SOI 12⁰ BTDC



Gambar 4.5. c Grafik Nilai Effisiensi Thermal Fungsi Beban pada SOI 14⁰ BTDC.



Gambar 4.5. d Grafik Nilai Effisiensi Thermal Fungsi Beban pada SOI 16⁰ BTDC.

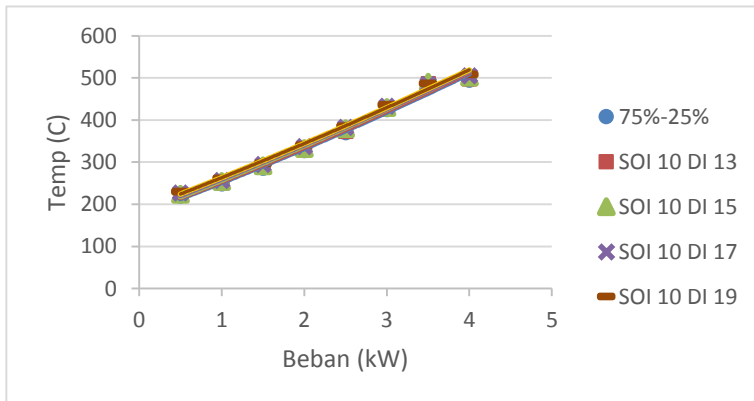
Gambar 4.5 di atas menunjukkan nilai efisiensi thermal fungsi beban pada durasi injeksi 13, 15, 17, dan 19 ms. Dari gambar di atas terlihat bahwa efisiensi thermal tertinggi ada pada penggunaan injeksi bertingkat semprotan 75%-25% standar, dan kemudian diikuti penurunan nilai efisiensi thermal yang dioperasikan dengan variasi durasi injeksi dan start injeksi. Hal ini disebabkan karena pada pengoperasian semprotan 75%-25% standar, besar energi input melalui bahan bakar yang masuk ke ruang bakar lebih besar untuk beban yang sama. Grafik juga menunjukkan bahwa efisiensi thermal cenderung naik seiring bertambahnya beban sampai pada nilai maksimum, kemudian nilainya menurun.

Dapat dilihat bahwa ada hubungan antara *sfc* dengan nilai efisiensi thermal yang dihasilkan. Saat *sfc* turun hingga nilai terendah maka efisiensi thermal naik hingga bernilai maksimum, yang menggambarkan bahwa dengan naiknya efisiensi thermal maka semakin banyak bahan bakar yang dapat dikonversi selama proses pembakaran menjadi daya yang dikeluarkan melalui poros mesin. Saat nilai *sfc* naik kembali maka nilai efisiensi thermal turun yang mengindikasikan semakin banyak bahan bakar yang terbuang

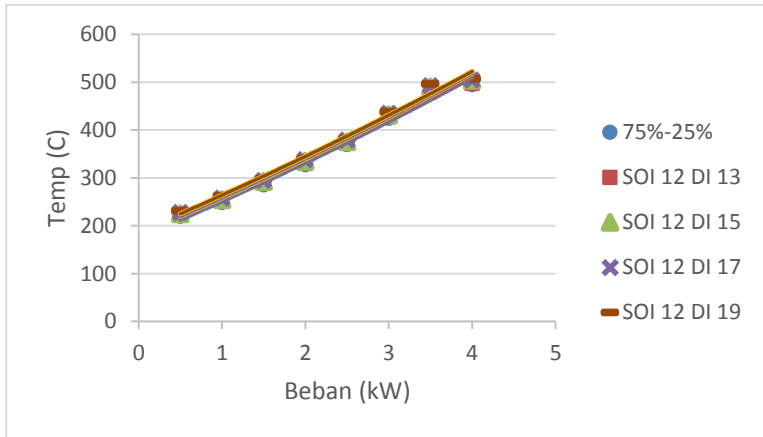
bersama gas sisa pembakaran karena tidak dapat dikonversi menjadi daya mesin pada saat proses pembakaran berlangsung di ruang bakar.

Dari variasi durasi injeksi dan *start of injection* bahan bakar biodiesel menunjukkan efisiensi *thermal* (η_{th}) terbaik terjadi pada durasi injeksi 13 ms, dan *start of injection* dengan derajat sebesar 10° CA BTDC. Hal ini menunjukkan bahwa besar derajat start injeksi yang optimum untuk menghasilkan efisiensi maksimal ketika menggunakan bahan bakar biodiesel sebesar 10° CA BTDC pada durasi injeksi 13 ms, karena meningkatnya jumlah massa bahan bakar biodiesel masuk ke ruang bakar sehingga lebih banyak dimana energi di ruang bakar. Naiknya efisiensi *thermal* (η_{th}) seiring dengan lamanya durasi injeksi dan *start of injection* yang dimundurkan, hal ini disebabkan semakin banyak tersedianya waktu untuk proses penyalaan bahan bakar pilot sebelum bahan bakar biodiesel masuk ke ruang bakar. Energi hasil pembakaran yang besar juga didapatkan dari laju pembakaran yang cepat karena semakin banyak campuran udara dan bahan bakar yang dapat terbakar maka efisiensi *thermal* (η_{th}) akan bertambah.

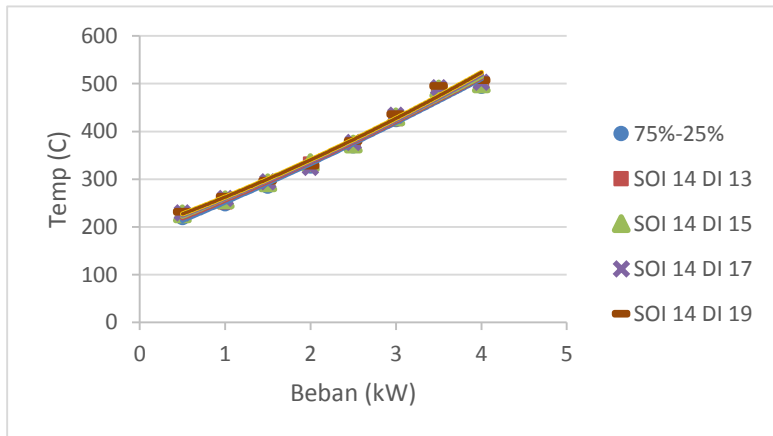
4.4.6 Analisa Temperatur Gas Buang.



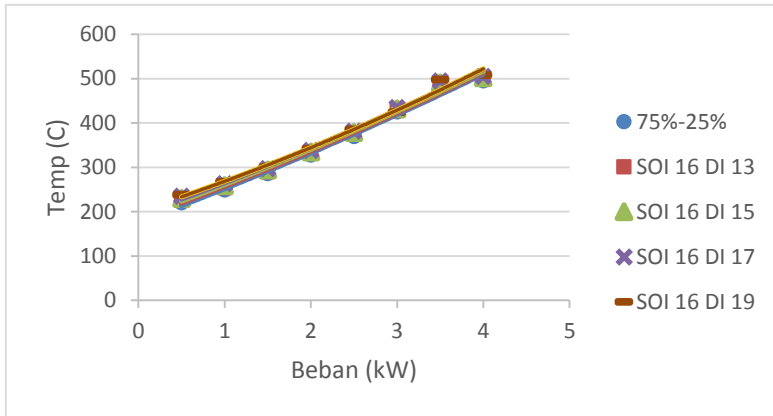
Gambar 4.6. a Grafik Temperatur Gas Buang Fungsi Beban dengan SOI 10° BTDC.



Gambar 4.6. b Grafik Temperatur Gas Buang Fungsi Beban dengan SOI 12⁰ BTDC



Gambar 4.6. c Grafik Temperatur Gas Buang Fungsi Beban dengan SOI 14⁰ BTDC.



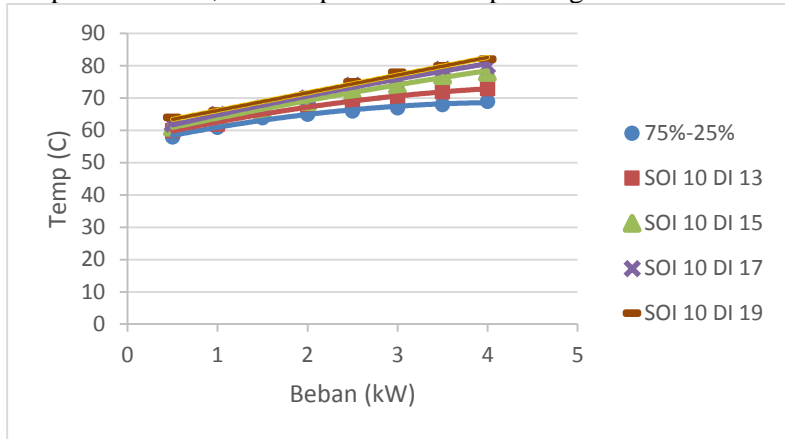
Gambar 4.6. d Grafik Temperatur Gas Buang Fungsi Beban dengan SOI 16° BTDC.

Gambar diatas menunjukkan seiring bertambahnya beban, temperatur gas buang cenderung naik. Kenaikan ini disebabkan dengan bertambahnya jumlah kebutuhan bahan bakar untuk meningkatkan daya yang bertujuan kompensasi dari kenaikan beban. Volume bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar semakin banyak sehingga pembakaran yang terjadi akan semakin besar, sehingga temperatur gas buang ikut meningkat.

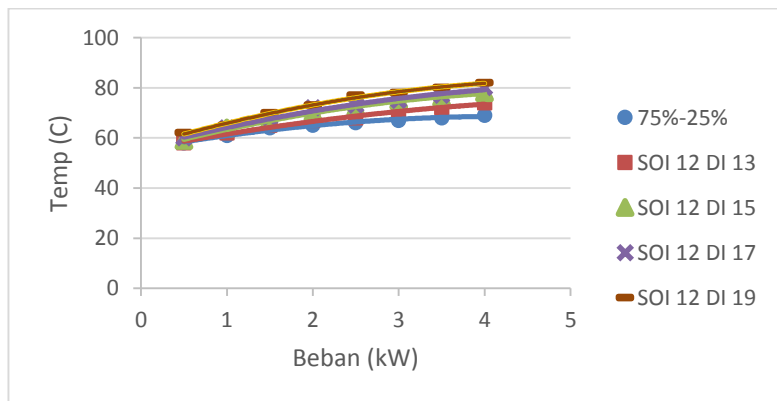
Pada pengoperasian injeksi bertingkat dengan pengaturan *start of injection* dan durasi injeksi nilai temperatur gas buang lebih tinggi dibandingkan pengoperasian 75%-25%. Pada grafik ini terlihat kenaikan temperatur dari setiap penambahan durasi injeksi biodiesel, hal ini disebabkan oleh peningkatan energi yang masuk ke ruang bakar seiring dengan peningkatan massa biodiesel yang masuk ke ruang bakar. Peningkatan temperatur gas buang pada mesin dapat berpengaruh pada emisi NO_x yang dihasilkan. Semakin tinggi peningkatan temperatur gas buang pada mesin, semakin tinggi emisi NO_x yang dihasilkan dan berdampak pada lingkungan sekitar.

4.4.7 Analisa Temperatur Mesin.

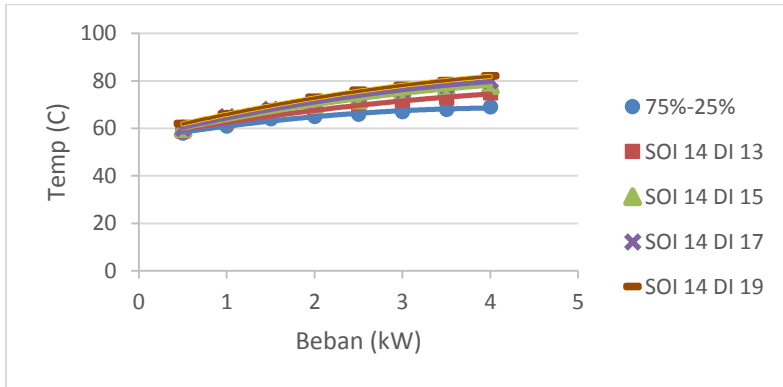
Data yang diambil untuk temperatur gas buang didukung dengan data yang diambil untuk temperatur minyak pelumas, temperatur mesin, dan temperatur cairan pendingin di bawah ini:



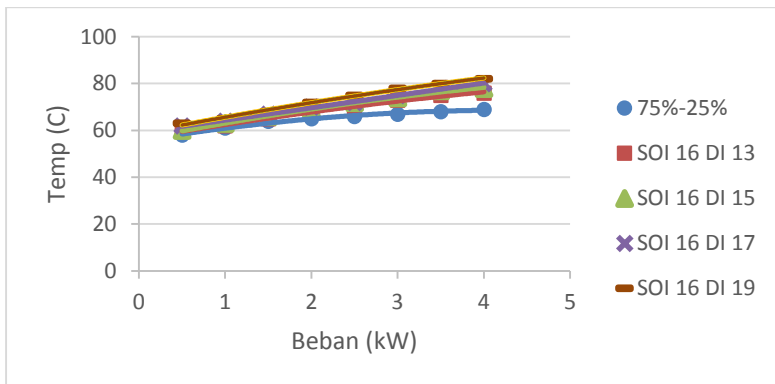
Gambar 4.7. a Grafik Temperatur Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 10⁰ BTDC.



Gambar 4.7. b Grafik Temperatur Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 12⁰ BTDC.



Gambar 4.7. c Grafik Temperatur Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 14° BTDC.

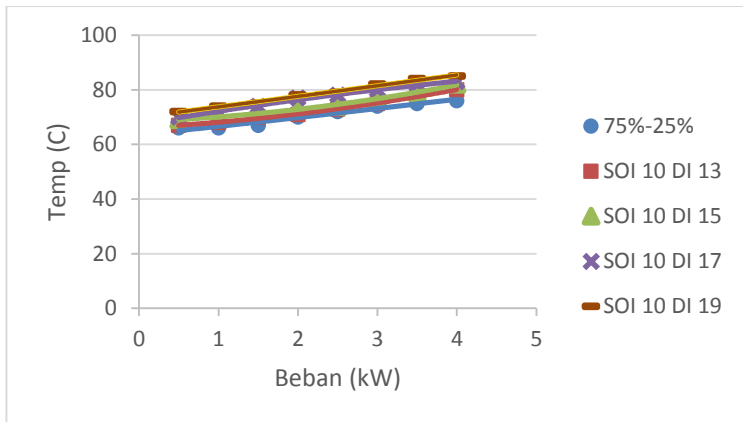


Gambar 4.7. d Grafik Temperatur Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 16° BTDC.

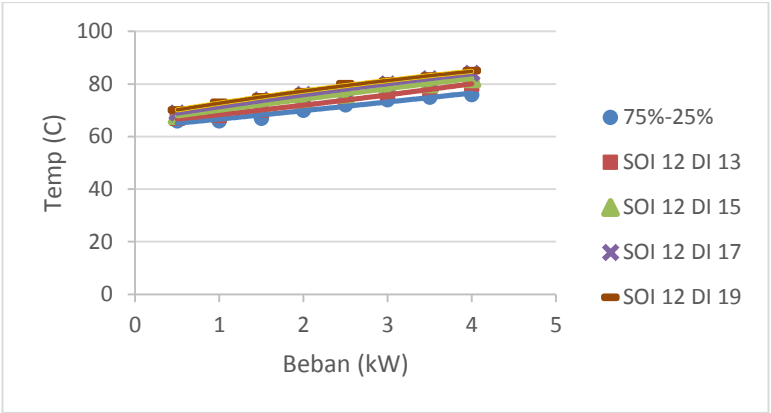
Gambar 4.7 menunjukkan grafik temperatur *engine* terhadap beban. Semua kondisi grafik pada gambar diatas memiliki tren yang sama, yaitu terjadi kenaikan temperatur seiring beban mesin. Semakin meningkatnya beban maka jumlah bahan bakar yang masuk ke ruang bakar akan semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang dilepas ke dinding silinder juga semakin banyak, sehingga temperatur *engine* pun naik.

Pada pengoperasian injeksi bertingkat dengan variasi durasi injeksi nilai temperature *engine* lebih tinggi dibandingkan pengoperasian 75%-25%. Pada grafik ini terlihat kenaikan temperature dari setiap penambahan durasi injeksi biodiesel, hal ini disebabkan oleh peningkatan energi yang masuk ke ruang bakar seiring dengan peningkatan massa biodiesel yang masuk ke ruang bakar. Peningkatan temperatur mesin dapat berdampak pada performa mesin, umur mesin, *overheat*, dan dampak bahaya lain terutama pada mesin.

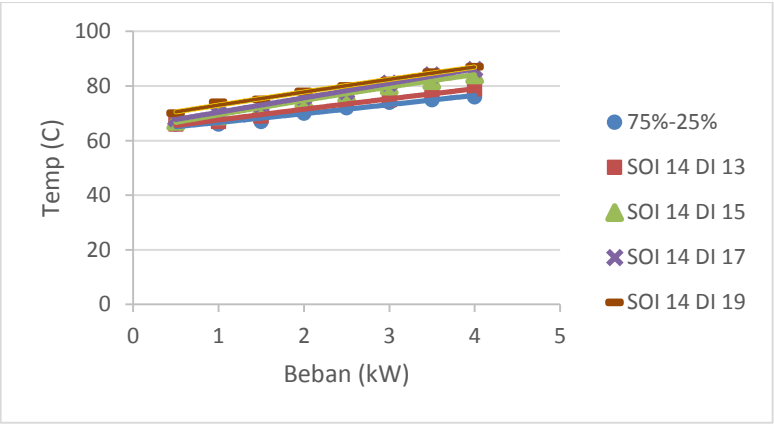
4.4.8 Analisa Temperatur Oli.



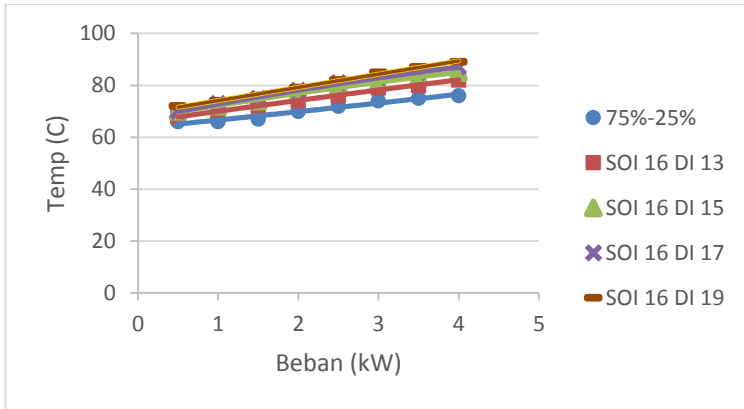
Gambar 4.8. a Grafik Temperatur Oli Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 10⁰ BTDC.



Gambar 4.8. b Grafik Temperatur Oli Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 12⁰ BTDC.



Gambar 4.8. c Grafik Temperatur Oli Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 14⁰ BTDC.

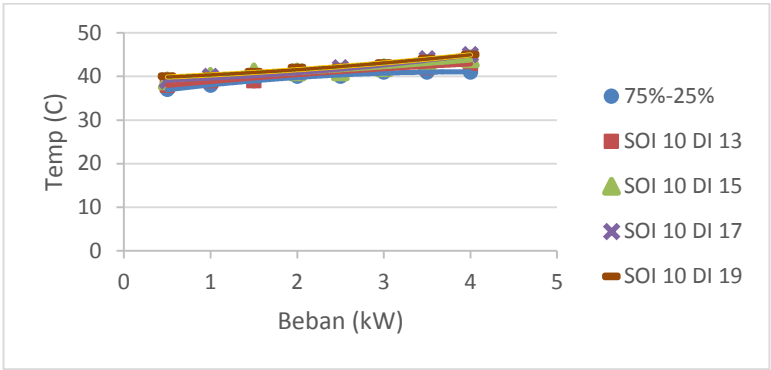


Gambar 4.8. d Grafik Temperatur Oli Mesin Fungsi Beban Dengan SOI 16⁰ BTDC.

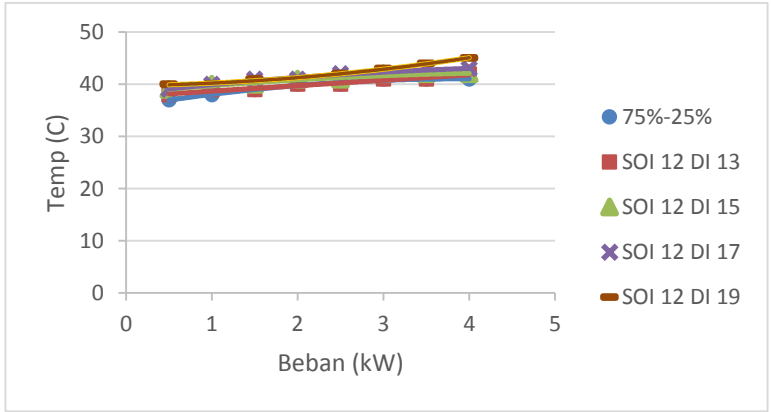
Gambar 4.8 menunjukkan grafik temperatur oli terhadap beban. Semua kondisi grafik pada gambar diatas memiliki tren yang sama, yaitu terjadi kenaikan temperatur seiring beban mesin. Semakin meningkatnya beban maka jumlah bahan bakar yang disuplai ke ruang bakar akan semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang dilepas ke dinding silinder lalu diserap oli juga semakin banyak, sehingga temperatur minyak pelumas naik.

Pada pengoperasian injeksi bertingkat semprotan 75%-25% dengan nilai temperatur minyak pelumas lebih rendah dibandingkan pengoperasian injeksi bertingkat dengan variasi durasi injeksi. Pada grafik ini terlihat kenaikan temperatur dari setiap penambahan durasi injeksi biodiesel, hal ini disebabkan oleh peningkatan energi yang masuk ke ruang bakar seiring dengan peningkatan massa biodiesel yang masuk ke ruang bakar. Temperatur pelumas yang semakin tinggi, berdampak pada konsumsi pelumas pada mesin yang juga semakin boros serta kualitas dari oli.

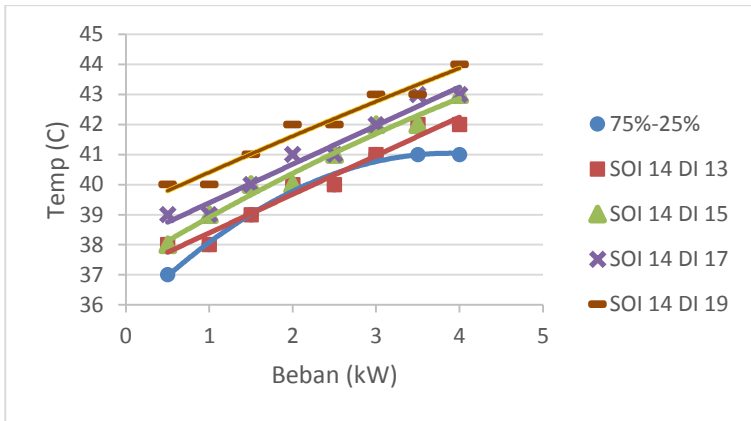
4.4.9 Analisa Temperatur Cairan Pendingin.



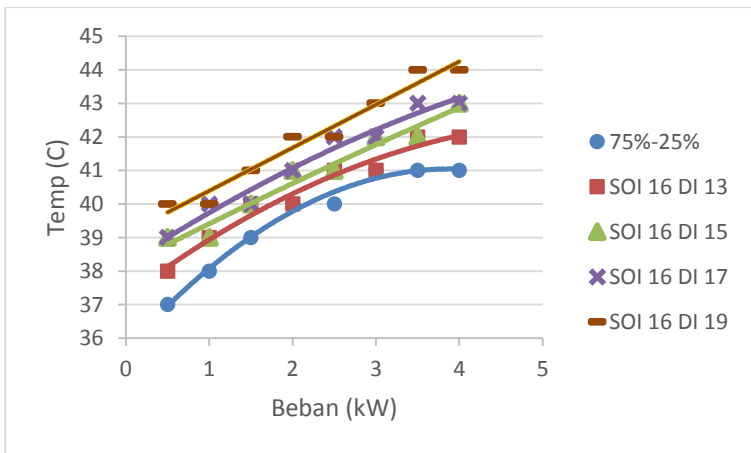
Gambar 4.9. a Grafik Temperatur Pendingin Fungsi Beban Dengan SOI 10⁰ BTDC.



Gambar 4.9. b Grafik Temperatur Pendingin Fungsi Beban Dengan SOI 12⁰ BTDC.



Gambar 4.9. c Grafik Temperatur Pendingin Fungsi Beban Dengan SOI 14⁰ BTDC.



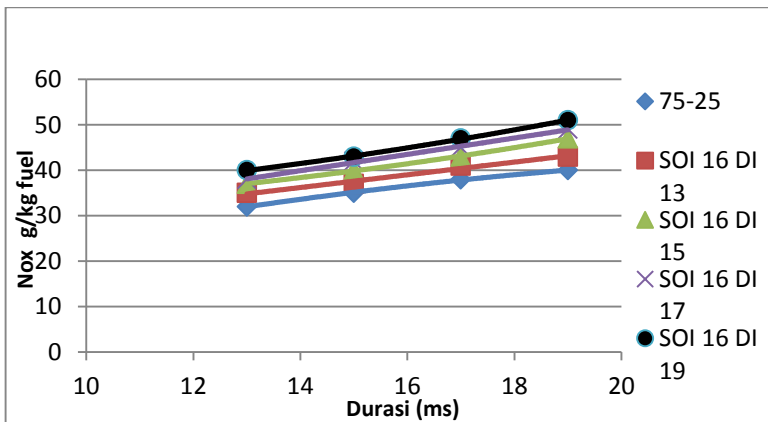
Gambar 4.9. d Grafik Temperatur Pendingin Fungsi Beban Dengan SOI 16⁰ BTDC.

Gambar 4.9 menunjukkan grafik temperatur cairan pendingin terhadap beban. Semua kondisi grafik pada gambar

diatas memiliki tren yang sama, yaitu terjadi kenaikan temperatur seiring beban mesin. Semakin meningkatnya beban maka jumlah bahan bakar yang disuplai ke ruang bakar akan semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang dilepas ke dinding silinder yang diserap cairan pendingin juga semakin banyak, sehingga temperatur cairan pendingin naik.

Pada pengoperasian injeksi bertingkat semprotan 75%-25% dengan nilai temperatur cairan pendingin lebih rendah dibandingkan pengoperasian injeksi bertingkat dengan variasi durasi injeksi. Pada grafik ini terlihat kenaikan temperatur dari setiap penambahan durasi injeksi biodiesel, hal ini disebabkan oleh peningkatan energi yang masuk ke ruang bakar seiring dengan peningkatan massa biodiesel yang masuk ke ruang bakar. Temperatur air pendingin meningkat berdampak pada penggunaan air pendingin yang juga semakin banyak agar mesin tidak sampai terjadi *overheat* yang dapat merusak mesin.

4.4.10 Analisa Gas Buang NO_x.



Gambar 4.10. Grafik Durasi Injeksi Fungsi NO_x Dengan SOI 16⁰ BTDC

Gambar 4.10 menunjukkan grafik durasi injeksi terhadap emisi NO_x. Semua kondisi grafik pada gambar diatas memiliki tren yang sama, yaitu terjadi kenaikan emisi NO_x seiring bertambahnya durasi injeksi mesin. Semakin lamanya durasi injeksi yang disemprotkan maka jumlah bahan bakar yang disuplai ke ruang bakar akan semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang dilepas ke dinding silinder juga semakin banyak, sehingga emisi NO_x naik.

Pada pengoperasian injeksi bertingkat semprotan 75%-25% standar dengan nilai emisi NO_x yang lebih rendah dibandingkan pengoperasian injeksi bertingkat dengan variasi durasi injeksi. Pada grafik ini terlihat kenaikan emisi NO_x dari setiap penambahan durasi injeksi biodiesel, hal ini disebabkan oleh peningkatan energi yang masuk ke ruang bakar seiring dengan peningkatan massa biodiesel yang masuk ke ruang bakar.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Dari serangkaian pengujian, perhitungan, dan analisis data yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada sistem injeksi bertingkat 75%-25% dengan pengaturan *start of injection* dan pengaturan durasi injeksi dari perhitungan yang dilakukan, nilai daya, torsi, dan bmep mengalami peningkatan dibandingkan dengan injeksi bertingkat 75%-25% standar. Dengan kenaikan tertinggi pada pengaturan *start of injection* 16° CA BTDC dan pengaturan durasi injeksi 19 ms sebesar 5,56 %, 8,2 %, dan 7,9 % dan kenaikan terendah sebesar 0,7 %, 0,7 %, dan 0,9 % pada pengaturan *start of injection* 10° CA BTDC dan pengaturan durasi injeksi 13 ms.
2. Nilai Sfc pada sistem injeksi bertingkat 75%-25% dengan pengaturan *start of injection* dan pengaturan durasi injeksi mengalami kenaikan dibandingkan sistem injeksi bertingkat 75%-25% standar. Dengan kenaikan nilai Sfc tertinggi sebesar 5,84 % pada pengaturan *start of injection* 16° CA BTDC dan pengaturan durasi injeksi 19 ms dan terendah pada pengaturan *start of injection* 10° CA BTDC dan pengaturan durasi injeksi 13 ms sebesar 1,16 %.
3. Nilai efisiensi thermal pada sistem injeksi bertingkat 75%-25% dengan pengaturan *start of injection* dan pengaturan durasi injeksi mengalami penurunan dibandingkan sistem injeksi bertingkat 75%-25% standar. Dengan penurunan nilai efisiensi thermal paling tinggi sebesar 3,71 % pada pengaturan *start of injection* 16° CA BTDC dan pengaturan durasi injeksi 19 ms dan penurunan paling rendah pada pengaturan *start of injection* 10° CA BTDC dan pengaturan durasi injeksi 13 ms sebesar 0,82 %.
4. Produksi emisi NOx pada *start of injection* 16° CA BTDC dengan variasi durasi injeksi 13, 15, 17, dan 19 ms meningkat

dengan nilai rata-rata 6,1 % dibandingkan sistem injeksi bertingkat 75%-25% standar.

5. Dengan menggunakan sistem injeksi bertingkat 75%-25% pada pengaturan *start of injection* dan pengaturan durasi injeksi didapatkan kenaikan nilai daya, torsi, dan bmep akan tetapi menurunkan nilai efisiensi thermal dan terjadi kenaikan nilai sfc serta emisi NOx dibandingkan dengan sistem injeksi bertingkat 75%-25% standar.

V.2 Saran

Dari serangkaian pengujian, perhitungan, dan analisa data yang telah dilakukan, maka dapat diberikan beberapa saran untuk dikaji sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan pengujian lebih lanjut dengan memundurkan (ATDC) *start of injection* maupun dengan *start of injection* yang memajukan (BTDC) dan variasi pada durasi injeksi untuk mendapatkan durasi yang sesuai agar mendapatkan hasil unjuk kerja yang optimal.
2. Perlu digunakannya pompa injeksi bahan bakar yang kontinyu agar tekanan penginjeksian tetap terjaga.
3. Perlu adanya sistem pengumpul tekanan bahan bakar yang akan diinjeksikan agar tekanan dapat ditampung dan dapat dikontrol besarnya tekanan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. **Knothe, Gerhard** (2004). *"The biodiesel Handbook"*, AOCS Press. Illinois.
- [2]. **Sudarmanta, Bambang., Soeharto, Sampurno.,** (2012). *"Simulasi Numerik Pembakaran Sistem Injeksi Single dan Sistem Injeksi 2 Tingkat pada Semprotan Bebas dan pada Ruang Bakar Mesin Diesel Caterpillar 3406 serta Pengaruhnya terhadap Emisi Gas NO"*, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin IX, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya.
- [3]. **Suh, Hyun Kyu** (2011). *"Investigations of multiple injection strategies for the improvement of combustion and exhaust emissions characteristics in a low compression ratio (CR) engine"*, Department of Mechanical Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA.
- [4]. **Nehmer, D. A., & Reitz. R. D.,** (1994). *"Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NOx Emissions"*, SAE Paper 940668.
- [5]. **Han, Z., Uludogan, A., Hampson, G. J., & Reitz. R. D.,** (1996). *"Mechanism of Soot and NOx Emission Reduction Using Multiple-Injection in a Diesel Engine"*, SAE Paper 960633.
- [6]. **Sudarmanta, Bambang., Kawano, D. Sungkono., Rachimoellah, M., Winardi, Sugeng.,** (2015), *"Pengaruh Penambahan Biodiesel Terhadap Unjuk Kerja Dan Emisi Motor Diesel Pada Derajat Waktu Injeksi Advanced"*, Jurnal Industri, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya.
- [7]. **Saifulloh, M. Mujib.,** (2013). *"Karakterisasi Unjuk Kerja Mesin Diamond Type Di 800 Dengan Sistem Injeksi Bertingkat Berbahan Bakar Biodiesel Kemiri Sunan"*

Dengan Perubahan Camshaft Fuel Pump”, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS Surabaya.

- [8]. *Encyclopedia Britannica*,. 4 stroke diesel cycle, www.Encyclopedia Britannica.co.uk
- [9]. **Kawano, D. Sungkono.**, (2011). “*Motor Bakar Torak (Diesel)*”, ITS Press. Surabaya
- [10]. <http://dewod.wordpress.com/2007/11/08/menjadi-bangsa-yang-mandiri-bersama-biofuel/> (8 november 2007)
- [11]. **Mr. Tune Up’s Auto Service** 2009. *Injector cut away diagram. Mr. Tune Up's Auto Service*
- [12]. **Denso Automotive Suppliers.**, (2006) *Five times Injection Diesel*.
- [13]. PT. Pgas Solution, Wilayah Surabaya. (2014), Surabaya.
- [14]. **Heywood, J. B.**, (1976). “*Internal Combustion Engine Fundamentals*”, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- [15]. **Mathur, M. L., & Sharma, R.P.**, (1980). “*A Course in Internal Combustion Engine*”, page 193, 3rd Edition, Dhanpat Rai & Son, Delhi.
- [16]. **Hardiyanto. Arief.**, (2012). “*Karakterisasi Unjuk Kerja Mesin Diamond Type Di 800 Dengan Variasi Tekanan Sistem Injeksi Bertingkat*”, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS Surabaya.
- [17]. **Warsita, Aris.** (2012), “*Pengaruh Injection Timing dan Prosentase Campuran Minyak Diesel dengan Bahan Bakar Biodiesel terhadap Karakteristik Mesin dan Emisi Gas Buang*,” TRAKSI, Vol.12, No.2, hal.1-15.

LAMPIRAN A

DATA HASIL PENGUJIAN

75-25									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.2	172	66	220	58	37
1	1000	2000	220	4.4	136	66	249	61	38
1.5	1500	2000	220	6.6	112	67	286	64	39
2	2000	2000	220	8.8	97	70	328	65	40
2.5	2500	2000	220	11.6	83	72	370	66	40
3	3000	2000	220	13.8	74	74	425	67	41
3.5	3500	2000	220	15.4	65	75	484	68	41
4	4000	2000	220	17.5	58	76	495	69	41

SOI 10, DI 13									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.2	168	67	222	60	38
1	1000	2000	220	4.5	134	68	251	62	39
1.5	1500	2000	220	6.6	107	70	289	65	39
2	2000	2000	220	8.7	95	71	330	68	41
2.5	2500	2000	220	11.7	79	73	373	69	41
3	3000	2000	220	13.8	70	75	428	70	42
3.5	3500	2000	220	15.5	63	78	487	72	42
4	4000	2000	220	17.5	56	80	498	73	43

SOI 10, DI 15									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.3	165	69	224	61	39
1	1000	2000	220	4.5	131	70	254	64	40
1.5	1500	2000	220	6.8	104	72	292	66	41
2	2000	2000	220	8.8	92	73	333	69	41
2.5	2500	2000	220	11.8	76	74	380	72	41
3	3000	2000	220	13.9	68	77	430	74	42
3.5	3500	2000	220	15.4	60	79	490	77	43
4	4000	2000	220	17.6	54	82	502	78	44

SOI 10, DI 17									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.3	162	70	227	62	39
1	1000	2000	220	4.5	127	72	257	65	40
1.5	1500	2000	220	6.7	101	74	295	67	40
2	2000	2000	220	8.8	89	77	337	70	41
2.5	2500	2000	220	11.9	73	78	383	74	42
3	3000	2000	220	14	65	80	433	76	42
3.5	3500	2000	220	15.4	58	82	485	79	44
4	4000	2000	220	17.7	53	83	505	80	45

SOI 10, DI 19

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.3	160	72	230	64	40
1	1000	2000	220	4.6	124	74	261	66	40
1.5	1500	2000	220	6.7	98	75	297	68	41
2	2000	2000	220	8.8	86	78	340	71	42
2.5	2500	2000	220	11.8	71	79	385	75	42
3	3000	2000	220	14	63	82	436	78	43
3.5	3500	2000	220	15.5	56	84	487	80	44
4	4000	2000	220	17.8	52	85	508	82	45

75-25

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.2	172	66	220	58	37
1	1000	2000	220	4.4	136	66	249	61	38
1.5	1500	2000	220	6.6	112	67	286	64	39
2	2000	2000	220	8.8	97	70	328	65	40
2.5	2500	2000	220	11.6	83	72	370	66	40
3	3000	2000	220	13.8	74	74	425	67	41
3.5	3500	2000	220	15.4	65	75	484	68	41
4	4000	2000	220	17.5	58	76	495	69	41

SOI 12, DI 13

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.2	167	67	223	58	38
1	1000	2000	220	4.5	132	68	252	62	39
1.5	1500	2000	220	6.6	106	70	289	65	39
2	2000	2000	220	8.7	93	72	331	67	40
2.5	2500	2000	220	11.7	78	74	374	68	40
3	3000	2000	220	13.8	68	76	428	70	41
3.5	3500	2000	220	15.3	62	78	487	72	41
4	4000	2000	220	17.5	55	80	498	74	42

SOI 12, DI 15

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.2	164	68	225	59	39
1	1000	2000	220	4.6	129	70	255	64	40
1.5	1500	2000	220	6.7	102	72	293	67	40
2	2000	2000	220	8.7	90	74	335	70	41
2.5	2500	2000	220	11.8	75	76	376	72	41
3	3000	2000	220	13.8	67	79	432	75	42
3.5	3500	2000	220	15.4	59	80	490	76	42
4	4000	2000	220	17.5	53	82	504	78	42

SOI 12, DI 17

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.3	161	69	228	60	39
1	1000	2000	220	4.6	125	71	258	64	40
1.5	1500	2000	220	6.8	99	74	295	68	41
2	2000	2000	220	8.7	88	76	338	72	41
2.5	2500	2000	220	11.9	71	78	379	73	42
3	3000	2000	220	13.9	64	80	435	75	42
3.5	3500	2000	220	15.5	57	82	493	77	43
4	4000	2000	220	17.6	52	84	505	80	43

SOI 12, DI 19

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.3	158	70	231	62	40
1	1000	2000	220	4.6	122	73	262	65	40
1.5	1500	2000	220	6.7	97	75	298	70	41
2	2000	2000	220	8.8	85	77	340	73	41
2.5	2500	2000	220	11.9	70	80	382	77	42
3	3000	2000	220	13.9	62	81	438	78	43
3.5	3500	2000	220	15.5	55	83	496	80	44
4	4000	2000	220	17.8	51	85	507	82	45

75-25

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.2	172	66	220	58	37
1	1000	2000	220	4.4	136	66	249	61	38
1.5	1500	2000	220	6.6	112	67	286	64	39
2	2000	2000	220	8.8	97	70	328	65	40
2.5	2500	2000	220	11.6	83	72	370	66	40
3	3000	2000	220	13.8	74	74	425	67	41
3.5	3500	2000	220	15.4	65	75	484	68	41
4	4000	2000	220	17.5	58	76	495	69	41

SOI 14, DI 13

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.2	166	66	225	59	38
1	1000	2000	220	4.5	130	67	253	63	38
1.5	1500	2000	220	6.7	105	69	290	66	39
2	2000	2000	220	8.8	92	72	332	68	40
2.5	2500	2000	220	11.7	76	74	372	69	40
3	3000	2000	220	13.9	66	75	427	71	41
3.5	3500	2000	220	15.4	60	77	487	73	42
4	4000	2000	220	17.6	54	79	498	75	42

SOI 14, DI 15

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.3	163	67	228	60	38
1	1000	2000	220	4.6	128	69	257	64	39
1.5	1500	2000	220	6.7	100	72	293	67	40
2	2000	2000	220	8.8	88	75	335	70	40
2.5	2500	2000	220	11.8	73	77	374	72	41
3	3000	2000	220	13.9	65	80	431	75	42
3.5	3500	2000	220	15.5	58	82	489	77	42
4	4000	2000	220	17.6	52	84	500	78	43

SOI 14, DI 17

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.3	160	68	230	60	39
1	1000	2000	220	4.7	123	70	260	65	39
1.5	1500	2000	220	6.8	98	73	295	68	40
2	2000	2000	220	8.7	87	76	325	71	41
2.5	2500	2000	220	11.9	70	78	377	74	41
3	3000	2000	220	14	63	81	434	76	42
3.5	3500	2000	220	15.5	55	84	492	78	43
4	4000	2000	220	17.6	51	86	503	80	43

SOI 14, DI 19

beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.3	157	70	232	62	40
1	1000	2000	220	4.6	120	74	263	66	40
1.5	1500	2000	220	6.8	95	75	297	69	41
2	2000	2000	220	8.9	83	78	328	73	42
2.5	2500	2000	220	11.9	69	80	380	76	42
3	3000	2000	220	14	61	82	436	78	43
3.5	3500	2000	220	15.5	54	85	495	80	43
4	4000	2000	220	17.7	49	87	507	82	44

75-25									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.2	172	66	220	58	37
1	1000	2000	220	4.4	136	66	249	61	38
1.5	1500	2000	220	6.6	112	67	286	64	39
2	2000	2000	220	8.8	97	70	328	65	40
2.5	2500	2000	220	11.6	83	72	370	66	40
3	3000	2000	220	13.8	74	74	425	67	41
3.5	3500	2000	220	15.4	65	75	484	68	41
4	4000	2000	220	17.5	58	76	495	69	41

SOI 16, DI 13									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.2	164	68	226	60	38
1	1000	2000	220	4.4	128	70	254	62	39
1.5	1500	2000	220	6.7	102	72	290	65	40
2	2000	2000	220	8.8	90	74	332	68	40
2.5	2500	2000	220	11.7	74	76	375	70	41
3	3000	2000	220	13.9	64	79	428	73	41
3.5	3500	2000	220	15.5	58	80	487	75	42
4	4000	2000	220	17.6	53	82	499	76	42

SOI 16, DI 15									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.2	162	70	230	60	39
1	1000	2000	220	4.6	126	72	259	63	39
1.5	1500	2000	220	6.7	98	74	294	66	40
2	2000	2000	220	8.8	87	77	335	69	41
2.5	2500	2000	220	11.8	72	80	379	72	41
3	3000	2000	220	13.9	63	81	432	74	42
3.5	3500	2000	220	15.5	57	83	491	77	42
4	4000	2000	220	17.6	52	85	502	78	43

SOI 16, DI 17									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.3	159	70	235	62	39
1	1000	2000	220	4.7	121	73	263	64	40
1.5	1500	2000	220	6.8	97	75	297	67	40
2	2000	2000	220	8.7	85	78	338	70	41
2.5	2500	2000	220	11.9	68	81	382	72	42
3	3000	2000	220	14	61	83	435	75	42
3.5	3500	2000	220	15.6	54	85	495	78	43
4	4000	2000	220	17.7	50	87	505	80	43

SOI 16, DI 19									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0.5	500	2000	220	2.3	156	72	238	63	40
1	1000	2000	220	4.6	118	74	267	65	40
1.5	1500	2000	220	6.8	93	76	300	68	41
2	2000	2000	220	8.9	81	79	342	72	42
2.5	2500	2000	220	11.9	68	82	385	75	42
3	3000	2000	220	14	60	85	424	78	43
3.5	3500	2000	220	15.7	53	87	498	80	44
4	4000	2000	220	17.8	48	89	508	82	44

LAMPIRAN B

PERHITUNGAN UNJUK KERJA

75-25

Ne	Ne	Mt	Bnep	Sfc	Eff	eff	eff				
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp.jam	%	generator %	Transmissi	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)
566.08	0.57	8.491	82.464	0.794	11.465	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00012488	39540
1132.16	1.13	16.982	164.927	0.502	18.130	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00015793	39540
1698.25	1.70	25.474	247.391	0.407	22.396	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00019177	39540
2264.33	2.26	33.965	329.854	0.352	25.862	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00022143	39540
2984.80	2.98	44.772	434.808	0.312	29.171	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00025878	39540
3550.88	3.55	53.263	517.271	0.294	30.940	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00029025	39540
3962.57	3.96	59.439	577.245	0.300	30.328	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00033044	39540
4502.92	4.50	67.544	655.960	0.296	30.753	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00037032	39540

SOI 10 DI 13											
Ne	Ne	Mt	Bnep	Sfc	Eff	eff	eff	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp.jam	%	generator %	Transmissi				
566.08	0.57	8.491	82.464	0.813	11.198	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00012785	39540
1157.89	1.16	17.368	168.675	0.498	18.270	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00016029	39540
1698.25	1.70	25.474	247.391	0.426	21.397	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00020073	39540
2238.60	2.24	33.579	326.106	0.364	25.041	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00022609	39540
3010.53	3.01	45.158	438.556	0.325	28.005	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00027188	39540
3550.88	3.55	53.263	517.271	0.311	29.268	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00030684	39540
3988.30	3.99	59.825	580.993	0.308	29.586	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00034093	39540
4502.92	4.50	67.544	655.960	0.307	29.692	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00038354	39540

SOI 10 DI 15											
Ne	Ne	Mt	Bnep	Sfc	Eff	eff	eff	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp.jam	%	generator %	Transmissi				
591.81	0.59	8.877	86.212	0.792	11.498	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00013017	39540
1157.89	1.16	17.368	168.675	0.510	17.861	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00016396	39540
1749.71	1.75	26.246	254.887	0.425	21.427	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00020652	39540
2264.33	2.26	33.965	329.854	0.371	24.529	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00023346	39540
3036.26	3.04	45.544	442.304	0.335	27.171	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00028261	39540
3576.61	3.58	53.649	521.019	0.318	28.638	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00031586	39540
3962.57	3.96	59.439	577.245	0.325	27.995	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00035798	39540
4528.65	4.53	67.930	659.708	0.316	28.795	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00039775	39540

SOI 10 DI 17											
Ne	Ne	Mt	Bnep	Sfc	Eff	eff	eff	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp.jam	%	generator %	Transmissi				
591.81	0.59	8.877	86.212	0.807	11.289	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00013258	39540
1157.89	1.16	17.368	168.675	0.526	17.315	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00016912	39540
1723.98	1.72	25.860	251.139	0.444	20.503	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00021266	39540
2264.33	2.26	33.965	329.854	0.384	23.730	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00024133	39540
3061.99	3.06	45.930	446.053	0.346	26.320	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00029423	39540
3602.34	3.60	54.035	524.768	0.330	27.571	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00033044	39540
3962.57	3.96	59.439	577.245	0.336	27.062	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00037032	39540
4554.39	4.55	68.316	663.456	0.320	28.423	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00040523	39540

SOI 10 DI 19											
Ne	Ne	Mt	Bnep	Sfc	Eff	eff	eff	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp.jam	%	generator %	Transmissi				
591.81	0.59	8.877	86.212	0.817	11.150	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00013424	39540
1183.63	1.18	17.754	172.424	0.527	17.282	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00017321	39540
1723.98	1.72	25.860	251.139	0.458	19.894	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00021917	39540
2264.33	2.26	33.965	329.854	0.397	22.930	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00024975	39540
3036.26	3.04	45.544	442.304	0.359	25.384	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00030251	39540
3602.34	3.60	54.035	524.768	0.341	26.723	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00034093	39540
3988.30	3.99	59.825	580.993	0.346	26.299	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00038354	39540
4580.12	4.58	68.702	667.205	0.325	28.044	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00041305	39540

75-25																	
Ne	Nv	Nm	Bmp	Sfc	Eff	eff	eff										
Watt	Kw	Mm	Kpa	Kg/Hj.am	%	generator %	Transmissi	m bio (kg)	\$g bio	mdot bio (kg/s)	NKB (N4) /kg						
566.08	0.57	8.491	82.464	0.794	11.465	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00012488	39540						
1132.16	1.13	16.982	164.927	0.502	18.130	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00015793	39540						
1698.25	1.70	25.474	247.391	0.407	22.396	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00019177	39540						
2264.33	2.26	33.965	329.854	0.332	25.862	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00022143	39540						
2984.80	2.98	44.772	434.808	0.312	29.171	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00025788	39540						
3550.88	3.55	53.263	517.271	0.294	30.940	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00029025	39540						
3962.57	3.96	59.439	577.245	0.300	30.328	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00033044	39540						
4502.92	4.50	67.544	655.960	0.296	30.753	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00037032	39540						

SO| 12 D| 13

Ne	Ne	Mt	Bmpc	Sfc	Eff	eff	eff	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (N/kg)
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp-jam	%	generator %	Transmissi				
566.08	0.57	8.491	82.464	0.818	11.132	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00012861	39540
1157.89	1.16	17.368	168.675	0.506	17.997	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00016272	39540
1698.25	1.70	25.474	247.391	0.430	21.197	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00020263	39540
2238.60	2.24	33.579	326.106	0.371	24.514	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00023095	39540
3010.53	3.01	45.158	438.556	0.329	27.650	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00027537	39540
3350.88	3.55	53.263	517.271	0.320	28.432	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00031586	39540
3936.84	3.94	59.053	575.496	0.317	28.741	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00034643	39540
4502.92	4.50	67.544	655.960	0.312	29.162	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00039052	39540

SOI 12 DI 15

Ne	Ne	Mt	Bmp	Stc	Eff	eff	eff	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp.jam	%	generator %	Transmissi				
566.08	0.57	8.491	82.464	0.833	10.932	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00013097	39540
1183.63	1.18	17.175	172.424	0.506	17.979	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00016650	39540
1723.98	1.72	25.860	251.139	0.440	20.706	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00021057	39540
2238.60	2.24	33.579	326.106	0.384	23.723	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00023865	39540
3036.26	3.04	45.544	442.304	0.340	26.814	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00028638	39540
3550.88	3.55	53.263	517.271	0.325	28.014	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00032057	39540
3962.37	3.96	59.439	577.245	0.331	27.529	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00036404	39540
4502.92	4.50	67.644	655.960	0.324	28.102	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00040525	39540

SOI 12 DI 17

Ne Watt	Ne Kw	Mt N.m	Bmp Kpa	Sfc Kg/Hp.jam	Eff %	eff generator %	eff Transmissi	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)
591.81	0.59	8.877	86.212	0.812	11.219	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00013341	39540
1183.63	1.18	17.754	172.424	0.523	17.421	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00017183	39540
1749.71	1.75	26.246	254.887	0.446	20.397	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00021695	39540
2238.60	2.24	33.579	326.106	0.393	23.196	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00024407	39540
3601.99	3.06	45.930	446.053	0.356	25.599	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00030251	39540
3576.61	3.58	53.649	521.019	0.338	26.953	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00033560	39540
3988.30	3.99	59.825	580.993	0.340	26.768	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00037682	39540
4528.65	4.53	67.930	659.708	0.328	27.729	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00041305	39540

SOI 12 DI 19

No	Nw	Nt	Bmep	Sfc	Eff	eff	eff	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (MJ/kg)
Watt	Kw	Nm	Kpa	Kg/Kp.jam	%	generator %	Transmissi				
591.81	0.59	8.87	86.212	0.827	11.010	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00013594	39540
1183.63	1.18	17.754	172.424	0.535	17.003	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00017605	39540
1723.98	1.72	25.860	251.139	0.462	19.691	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00022143	39540
2264.33	2.26	33.963	329.854	0.402	22.663	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00025269	39540
3061.99	3.06	45.930	446.053	0.361	25.238	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00030684	39540
3576.61	3.58	53.649	521.019	0.349	26.111	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00034643	39540
3988.30	3.99	59.823	580.993	0.352	25.829	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00039052	39540
4380.12	4.58	68.702	667.205	0.331	27.509	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00042115	39540

75-25											
Ne	Ne	Mt	Bmep	Sfc	Eff	eff	eff	m bio (kg)	sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp.jam	%	generator %	Transmissi				
566.08	0.57	8.491	82.464	0.794	11.465	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00012488	39540
1132.16	1.13	16.982	164.927	0.502	18.130	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00015793	39540
1698.25	1.70	25.474	247.391	0.407	22.396	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00019177	39540
2264.33	2.26	33.965	329.854	0.352	25.862	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00022143	39540
2984.80	2.98	44.772	434.808	0.312	29.917	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00025878	39540
3550.88	3.55	53.263	517.271	0.294	30.400	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00029025	39540
3962.57	3.96	59.349	577.245	0.300	30.328	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00030304	39540
4502.92	4.50	67.434	655.960	0.296	30.753	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00037032	39540

SOL 14 DI 13															
Ne	Nm	Mt	Bmp	Str	Eff	eff	eff	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)				
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp.jam	%	generator %	Transmissi								
566.08	0.57	8.491	82.464	0.823	11.065	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00012939	39540				
1157.89	1.16	17.368	168.675	0.514	17.724	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00016522	39540				
1724.98	1.72	25.860	251.139	0.427	21.315	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00020456	39540				
2263.33	2.26	33.965	329.854	0.371	24.529	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00023346	39540				
3010.53	3.01	45.158	438.556	0.338	26.941	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00028261	39540				
3756.61	3.58	53.649	521.019	0.328	27.796	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00032543	39540				
3962.57	3.96	59.439	577.245	0.325	27.995	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00035798	39540				
4258.65	4.53	67.990	659.708	0.316	28.790	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00039775	39540				

SOI 14 DI 15											
Ne	Nw	Mt	Bmp	Sfc	Eff	eff	eff	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Kp.jam	%	generator %	Transmissi				
591.81	0.59	8.877	86.212	0.802	11.359	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00013177	39540
1183.63	1.18	17.754	172.424	0.510	17.840	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00016780	39540
1723.98	1.72	25.860	251.139	0.449	20.300	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00021479	39540
2264.33	2.26	33.963	329.854	0.388	23.463	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00024407	39540
3036.26	3.04	45.544	442.304	0.349	26.099	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00029247	39540
3576.61	3.58	53.649	521.019	0.333	27.374	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00033044	39540
3988.30	3.99	59.825	580.993	0.334	27.238	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00037032	39540
4528.65	4.53	67.930	659.708	0.328	27.729	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00041305	39540

So114 Di 17											
Ne	Ne	Mt	Bmp	Sfc	Eff	eff					
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp.jam	%	generator %	Transmissi	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (Mj/kg)
591.81	0.59	88.77	86.212	0.817	11.150	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00013424	39540
1209.36	1.21	18.140	176.172	0.520	17.515	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00017462	39540
1749.71	1.75	26.246	254.887	0.451	20.191	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00021917	39540
2238.60	2.24	33.579	326.106	0.397	22.933	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00024688	39540
3061.99	3.06	45.930	446.053	0.361	25.238	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00030684	39540
3602.34	3.60	54.035	524.768	0.341	26.723	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00034093	39540
3988.30	3.99	59.820	580.993	0.352	25.829	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00039052	39540
4258.65	4.53	67.930	659.708	0.335	27.196	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00042115	39540

SoI 14 Di 19											
Ne	Ne	Mt	Bmp	Sfc	Eff	eff	eff	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (MJ/kg)
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/Hp.jam	%	generator %	Transmissi				
591.81	0.59	18.777	86.212	0.832	10.941	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00013681	39540
1183.63	1.18	17.754	172.424	0.544	16.725	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00017899	39540
1749.71	1.75	26.266	254.887	0.465	19.573	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00022609	39540
2290.06	2.29	34.351	333.602	0.407	22.381	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00025878	39540
3061.99	3.06	45.930	446.053	0.366	24.878	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00031128	39540
3602.34	3.60	54.035	524.768	0.352	25.875	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00035211	39540
3958.30	3.99	59.825	580.993	0.359	25.260	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00039775	39540
4534.59	4.53	68.316	636.456	0.346	26.738	0.9	0.95	0.0214785	0.86	0.00043834	39540

BIODATA PENULIS



Penulis mempunyai nama lengkap Rahmat Sholeh Hanifa, dia lahir di Sragen pada tanggal 15 April 1992. Penulis mempunyai motto "*Always Try and Pray*". Dia anak ke-3 dari 5 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Pertiwi 1 Gemolong, SD N 1 Gemolong, SMP MTA Gemolong, SMA MTA Surakarta. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di D3 Teknik Mesin FTI-ITS.

Selama kuliah di D3 Teknik Mesin FTI-ITS, penulis selain beraktivitas sebagai mahasiswa juga aktif di organisasi yaitu menjadi Staff Humas HMDM tahun 2011-2012 kemudian menjadi Kepala Departemen Humas HMDM tahun 2012-2013. Setelah lulus dari D3 Teknik Mesin FTI-ITS, kemudian melanjutkan kuliah program studi Lintas Jalur S1 Teknik Mesin FTI-ITS. Selain itu, penulis juga aktif menjadi panitia kegiatan dan mengikuti berbagai pelatihan maupun lomba yang diadakan di tingkat Jurusan, Fakultas, dan Institut.